



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**EKONOMICKÉ ZPŮSOBY POUZDŘENÍ
INTEGROVANÝCH OBVODŮ A MODULŮ**

ECONOMIC ENCAPSULATION FOR INTEGRATED CIRCUITS AND MODULES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Kristek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Michal Kristek

ID: 155185 **Ročník:** 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Ekonomické způsoby pouzdrění integrovaných obvodů a modulů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši pouzdrění integrovaných obvodů a popište jednotlivé způsoby. Zaměřte se na levná a flexibilní nehermetická pouzdra realizovaná fluidizací a dle možností zkoumejte experimentálně jejich vlastnosti (elektrické a environmentální). Vytvořte náčrt jednoduchého fluidizačního zařízení a popište jeho jednotlivé části. Popište funkci vlhkostní komory a stanovte metodiku provedení testů. V experimentální části práce realizujte testy fluidizovaných vzorků dle dostupných norem se zaměřením na vliv vlhkosti a výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Konzultant:

doc. Ing. Lukáš Fajcik, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá způsoby pouzdření integrovaných obvodů a modulů a to především při použití levných a nehermetických pouzder. Součástí je také na základě zadaných informací a získaných teoretických poznatků návrh testovacího vzorku, který je určen k zapouzdření technologií fluidizace. Na základě výsledků testovacích metod bude nastíněno, kam dál se bude technologie uchylovat.

Klíčová slova

Pouzďení, fluidizace, fluidizační zařízení, zalévání, zastříkávání, lisování, hermetická pouzdra, nehermetická pouzdra

Abstract

This Master's thesis is about ways of packages of integration circuits and modules. Especially it's about non-hermetic types of packages. One part of this paper are basic information about packaging and aspects in design of package. Next parts are design of test samples, which are package to epoxide powder material. Based on the results of the tests method, it will propose, where the technology will be used.

Key words

Packaging, fluidization, fluidization bed, glop topping, underfilling, transfer molding, compression molding, hermetic package, non-hermetic package

Bibliografická citace

KRISTEK, M. *Ekonomické způsoby pouzdření integrovaných obvodů a modulů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 143 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „**Ekonomické způsoby pouzdření integrovaných obvodů a modulů**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 25. 5. 2017

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Alexandru Otáhalovi a panu Ing. Martinu Adámkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné rady při praktické realizaci mé diplomové práce.

V Brně dne 25. 5. 2017

.....

podpis autora

Experimentální část této diplomové práce byla podpořena výzkumnou infrastrukturou
vybudovanou v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

Úvod	8
1. Pouzdra a pouzdření v elektrotechnice	9
1.1. Vývoj pouzder	9
1.2. Základní materiál = základ pouzdření	14
1.2.1. Polovodičové základní materiály	14
1.2.2. Organické základní materiály	15
1.2.3. Anorganické základní materiály	18
1.3. Pouzdra a jejich rozdělení	19
1.3.1. Hermetická pouzdra	19
1.3.2. Nehermetická pouzdra	20
1.4. Materiály pro nehermetická pouzdra	20
1.4.1. Epoxidová pryskyřice	21
1.4.2. Silikony	22
1.5. Technologie výroby nehermetických pouzder	24
1.5.1. Zalévání	24
1.5.2. Lisování	26
1.5.3. Fluidizace	28
2. Popis fluidizačního zařízení	30
2.1. Materiály vhodné pro fluidizaci	31
3. Vlhkost, teplota a jejich vliv na elektronická zařízení	32
3.1. Tlustovrstvé senzory	33
4. Metody měření	34
4.1. Metoda hmotnostního zisku	34
4.2. Sledování změn rezistivity	35

4.3.	Norma ČSN EN 60068-2-67.....	35
5.	Klimatická komora.....	36
5.1.	Klimatická komora Shjianheng SDH01	36
5.1.1.	Popis komory.....	37
6.	Experimentální část.....	39
6.1.	Návrh testovacích vzorků	39
6.2.	Technologické kroky při výrobě vzorků.....	40
6.2.1.	Příprava a vrstvení sít	41
6.2.2.	Tisk tlustých vrstev	41
6.2.3.	Kontrola nanesené vrstvy.....	42
6.2.4.	Řezání a kontaktování vzorků	43
6.2.5.	Měření velikosti odporu	44
6.2.6.	Fluidizace	45
7.	Vyhodnocení.....	48
7.1.	Naměřené změny odporů po klimatickém namáhání.....	48
7.1.1.	Vertikální meandr $10 \Omega/\square$ zapouzdřený.....	49
7.1.2.	Vertikální meandr $10 \Omega/\square$ nezapouzdřený	50
7.1.3.	Vertikální meandr $10 \Omega/\square$ s dielektrickou vrstvou zapouzdřený	51
7.1.4.	Horizontální meandr $10 \Omega/\square$ s dielektrickou vrstvou nezapouzdřený.....	52
7.1.5.	Vertikální meandr $100 \Omega/\square$ zapouzdřený.....	53
7.1.6.	Horizontální meandr $100 \Omega/\square$ nezapouzdřený	54
7.1.7.	Horizontální meandr $100 \Omega/\square$ s dielektrickou vrstvou zapouzdřený.....	55
7.1.8.	Horizontální meandr $100 \Omega/\square$ s dielektrickou vrstvou nezapouzdřený.....	56
7.2.	Výpočet nejistoty použitých měřících přístrojů.....	57
7.3.	Hmotnostní zisk po klimatické zkoušce	59

7.4. Měření tloušťky nanesené vrstvy	60
7.5. Sledování struktury povrchu fluidizovaného pouzdra.....	61
7.6. Shrnutí dosažených výsledků	62
8. Závěr.....	63
Seznam použité literatury	64
Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	68
Seznam obrázků	69
Seznam příloh.....	72
Příloha 1: Varianty podob navrhovaných vzorků	73
Příloha 2: Negativy pro výrobu motivů sít	82
Příloha 3: Naměřené hodnoty testovacích vzorků.....	84
Příloha 4: Grafické výstupy naměřených hodnot.....	113

Úvod

Tak jako celé elektrotechnické odvětví, tak i pouzdrění prochází neustálým vývojem. Nové materiály a technologie vedou k neustálému zvyšování hustoty integrace a snižování rozměrů čipů a právě s vývojem čipů úzce souvisí i vývoj nových pouzder a pouzdřících technologií. Pouzdra zajišťují ochranu citlivých čipů před působením vnějších vlivů. Zajišťují mechanickou, chemickou i tepelnou ochranu čipu. Účel pouzdrění ovšem nespočívá jen v ochraně. Pouzdra zajišťují také napájení a vzájemné propojení mikrosystémových komponent. Kromě již zmíněných parametrů je také při vývoji cíleno na spolehlivost, cenu a především jednoduchou manipulaci při montáži.

V historickém ohledu prošlo pouzdrění neuvěřitelným vývojem a dnes máme k dispozici nespočet různých typů pouzder. Vývoj však neustává a pouzdra se neustále zdokonalují. Tato práce je zaměřena na nehermetická pouzdra vyrobená technologií fluidizace. Tato pouzdra jsou vhodným řešením pro pouzdrění hybridních integrovaných obvodů. Jedná se o elektrické obvody, které využívají technologie tlustých vrstev. Uplatnění lze nalézt v senzorice, automobilovém či leteckém průmyslu nebo dokonce v kosmonautice. Nacházejí uplatnění tam, kde je požadována tepelná a mechanická odolnost, vysoká spolehlivost, životnost a například práce s vysokými kmitočty.

Práce se zabývá nehermetickým pouzdrěním integrovaných obvodů, tedy levnější variantou výroby pouzder. Zaměřuje se především na využití technologie fluidizace a na sledování vlastností fluidizovaných pouzder. V praktické části budou zhotoveny vzorky pro sledování vlivu tepla a vlhkosti na fluidizovaná pouzdra. Testy budou probíhat podle normovaných klimatických zkoušek pro testování elektronických součástek. Získané výstupy budou zpracovány a diskutovány.

1. Pouzdra a pouzdření v elektrotechnice

1.1. Vývoj pouzder

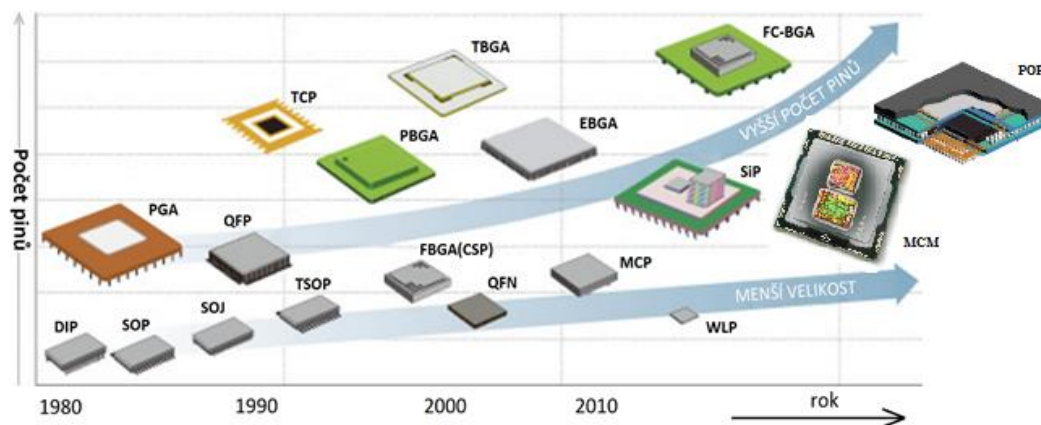
Jak již bylo zmíněno v úvodu, v elektronickém odvětví dochází k neustálému zvyšování úrovně integrace elektronických integrovaných obvodů a k současnému snižování jejich rozměrů. S tím souvisí i vývoj pouzder a pouzdřicích materiálů, který je znázorněn na obr. 1.

Vývoj nových pouzder závisí na následujících parametrech:

Parametry čipu – rozměry, výkon, rychlost, počet vývodů, aj.

Požadavky na systém – provedení, spolehlivost, rozměry, cena

Proces výroby – pájitelnost, manipulace, testovatelnost



Obr. 1 Vývoj technologie pouzdření [16]

První typy integrovaných obvodů byly pouzřeny do kovových a keramických pouzdrech, ale z důvodu ekonomické náročnosti těchto pouzder byla vyvinuta levnější plastová pouzdra typu **SIPx** – *Single in package* a **DIPx/DILx** – *Dual in package* (obr. 2). Pouzdra byla vyvinuta v 70. letech 20. století s vývody z jedné nebo dvou stran s roztečí 2,54 mm. Parametr x udává počet vývodů příslušného pouzdra (až 86 vývodů). Jsou vhodná pouze pro integrované obvody s nízkým počtem vývodů, protože s nárůstem vývodů roste neúměrně i velikost pouzdra. [1]



Obr. 2 Pouzdro SIP [20]



Pouzdro DIL [21]

S vývojem integrovaných obvodů a nástupem SMT technologie (technologie povrchové montáže), rostl i počet vývodů součástek. Odpovědí na rostoucí počet vývodů byla zcela nová pouzdra **SOIC** – *Small outline integrate circuit* nebo jen **SO** – *Small outline*. Výhodou tohoto typu pouzdra jsou především menší rozměry a menší rozteč vývodů (1,27 mm a méně). Pouzdra s roztečí vývodů 1 mm a méně nesou označení *Fine Pitch*. SO pouzdra se vyrábí v několika modifikacích, které se od sebe liší rozměry pouzdra či menší roztečí vývodů [1]:

- MSOIC („Micro - SOIC“)
- SOJ („Small outline J - leaded package“)
- PSOP („Plastic small outline package“)
- TSOP („Thin small outline package“)
- TSSOP („Thin shrink small outline package“)



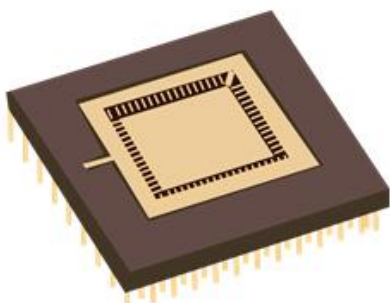
Obr. 3 Pouzdro SOT-23-5 [22]



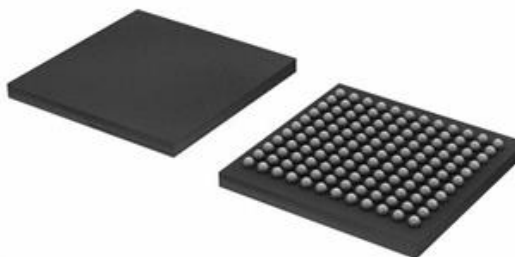
Pouzdro SSOP [21]

Dalším významným milníkem byla pouzdra **PGA** – *Pin grid array*. Tato pouzdra disponují vyšším stupněm integrace integrovaných obvodů než předchozí pouzdra. Jsou opatřena horizontálními drátovými vývody, které se nacházejí spodní části čipu v několika řadách s roztečí 2,54 mm. Pouzdra PGA byla později postupně vytlačena pouzdry **BGA** – *Ball grid array*. Tato pouzdra jsou hojně využívána dodnes. Jedná se o pouzdra s celoplošnými kulovými vývody, které jsou tvořeny kuličkami pájky a nachází se také na spodní straně čipu. Velikost kuličkových vývodů se pohybuje řádově od 100 μm do 10 μm . Motivy rozložení kuličkových vývodů mohou být různé (podle aplikace). BGA pouzdra jsou k dispozici také v několika modifikacích [1]:

- PBGA („Plastic ball grid array“)
- CBGA („Ceramic ball grid array“)
- TBGA („Thin ball grid array“)
- MBGA („Micro ball grid array“)
- VFBGA („Very fine pitch ball grid array“)
- FCBGA („Flip chip ball grid array“)
- a mnoho dalších...



Obr. 4 Pouzdro PGA [23]



Pouzdro BGA [24]

Krátce po nástupu pouzdra PGA následovala pouzdra **QFP** – *Quad Flat Package*, která jsou opatřena vývody ze všech čtyř stran. Jsou určena pouze pro povrchovou montáž a jsou vyráběna v modifikacích s 32 až 304 vývody a roztečí vývodů 1,27 mm, 0,51 mm a 0,30 mm. Mezi známé modifikace patří [1]:

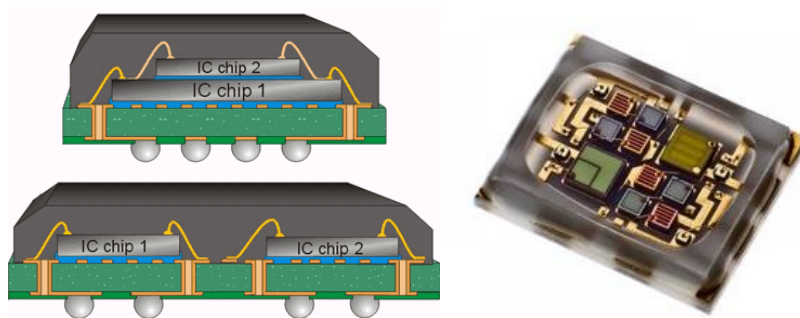
- TQFP („Thin quad flat package“)
- FQFP („Fine quad flat package“)

- CQFP („Ceramic quad flat package“)
- EQFP („Plastic enhanced quad flat package“)
- A mnoho dalších...



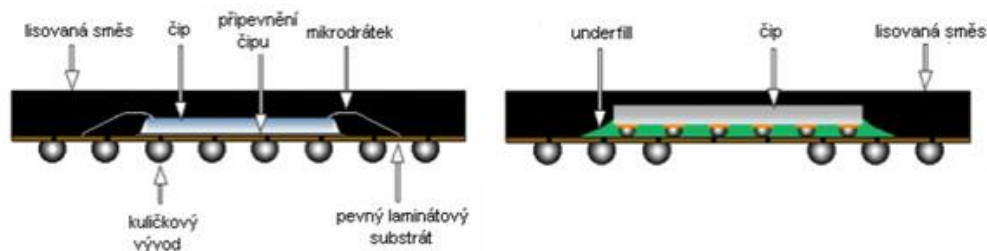
Obr. 5 Pouzdro QFP [26]

Z vývoje a zlepšování provedení přímého připojení čipu na substrát vzešla již zmiňovaná pouzdra BGA, v nichž je čip připojen prostřednictvím vodivých drátků (25 μ m) na vývodový systém vytvořený uvnitř pouzdra (metoda *Wire Bonding*). Vývody součástky jsou kulového tvaru a nachází se na spodní straně pouzdra. Tato pouzdra společně s MCM – *Multi Chip Module* jsou průkopníky trojrozměrného uspořádání součástek. Jak je patrné již z názvu, je MCM technologie, která v rámci jednoho pouzdra obsahuje několik integrovaných obvodů a čipů.



Obr. 6 Technologie Multi Chip Module [27]

Vývojem prošlo také připojení čipu na substrát. Technologie nese označení *Flip Chip*, což v překladu znamená otočený čip. Označení vychází z metody, kterou je čip uchycen k substrátu. Čip může být uchycen aktivní stranou (směrem k substrátu) prostřednictvím kuličkových nebo sloupcových vývodů. V druhém případě je propojen se substrátem prostřednictvím mikrodrátků z horní strany čipu metodou wire bonding. [1]



Obr. 7 Technologie Flip Chip [19]

V současnosti prochází vývojem nová technologie pouzdření. Technologie je označována jako WLP – *Wafer Level Packaging* (obr. 8) a její předností je pouzdření integrovaného obvodu ještě na waferu. Wafer je křemíkový substrát kruhového tvaru, na kterém se vytváří mikroobvody. Přínosem nové technologie je kromě procesu pouzdření přímo na waferu získání menších rozměrů pouzdřených integrovaných obvodů, které odpovídají velikosti čipu waferu.



Obr. 8 Rozdíl mezi běžnými technologiemi pouzdření a technologií WLP [34]

1.2. Základní materiál = základ pouzdření

Nedílnou součástí elektronických obvodů je nosný substrát, jinak označovaný jako základní materiál. Základní materiál slouží jako nosič vodivého motivu a pasivních, aktivních a konstrukčních prvků. Dále zajišťuje propojení polovodičového čipu do systému, vzájemně izoluje elektronické prvky, chrání čip před působením mechanických a chemických vlivů a v neposlední řadě odvádí přebytečné teplo od čipu. Podle použitého materiálu lze základní materiály rozdělit na polovodičové, organické a anorganické. [3]

1.2.1. Polovodičové základní materiály

Nejrozšířenějšími materiály pro výrobu polovodičových základních materiálů jsou křemík (Si) a arsenid gallia (GaAs). Tyto materiály jsou vhodné pro výrobu polovodičových desek tzv. *wafery*. Wafery jsou polovodičové sustráty, na kterých se realizují polovodičové struktury.

Křemík je charakterizován jako polokov a je hojně využíván pro výrobu polovodičových součástek. Po kyslíku je druhým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře. Ovšem nevyskytuje se v čisté formě, nýbrž v různých sloučeninách. Pro výrobu polovodičových součástek je používán velmi čistý křemík ve formě monokrystalu. Monokrystal křemíku lze získat řízenou krystalizací z taveniny. Tento proces je nazýván Czochralského metoda výroby monokrystalu. Jedná se o metodu, kdy je do křemíkové taveniny, jejíž teplota je sledována a řízena, vložen zárodek vysoce čistého krystalu křemíku, který se otáčí a pulzuje podle nastaveného programu. Vše probíhá v nádobách z velmi čistého křemene a v atmosféře tvořené argonem. Čistý křemík narůstá na zárodku křemíku, přičemž výsledný produkt, křemíkový ingot, může být až 400 mm široký a až 2 m dlouhý. Před tažením je křemík dotován polovodičem typu P nebo N. Ingot je následně rozřezán na tenké vrstvy (wafery), leštěn a použit na výrobu polovodičových čipů. [4]

Druhým nejpoužívanějším materiálem je arsenid gallia. Jedná se o sloučeninu gallia a arsenu. Materiál lze získat Czochralského nebo Bridgman-Stockbargerovou metodou.

V porovnání vlastností s křemíkem vyniká především větší pohyblivostí elektronů a vyšší maximální driftovou rychlostí. Z toho plyne vhodnost použití materiálu pro práci při vysokých kmitočtech. Na stejné úrovni kmitočtu může mít čip GaAs větší rozměry než Si čip, může tedy

pracovat s většími výkony, má nižší sériový odpor a lepší šumové vlastnosti aktivních prvků. [1].

Souhrn vybraných vlastností polovodičových materiálů je znázorněn v tab. 1.

Tab. 1 Vybrané vlastnosti polovodičových materiálů [1]

Parametr/Materiál	Si	GaAs
Permitivita ϵ_r (1 MHz)	16	12,9
Pohyblivost elektronů μ_e [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]	3790	8550
Pohyblivost děr μ_d [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]	1780	400
Měrný odpor [$\Omega\cdot\text{m}$]	4000	640

1.2.2. Organické základní materiály

Další významnou skupinou základních materiálů jsou organické základní materiály. Tyto substráty jsou tvořeny **výztuží** a **pojivem**. Podle tuhosti je dále dělíme na ohebné a neohebné. Úroveň tuhosti materiálu ovlivňuje typ použitého pojiva. V případě ohebných základních materiálů se jako pojivo používá materiál typu termoplast a v případě neohebných materiálů typu termoset.

Výztuž určuje mechanické vlastnosti substrátu, rozměrovou stálost v daném teplotním rozsahu a ovlivňuje elektrické, tepelné a chemické charakteristiky. Mezi nejpoužívanější materiály pro výztuž se používají skleněná vlákna a tkaniny nebo tvrzený papír.

Pojiva zrovnoměňují působení vnějších vlivů na výztuž a chrání ji před mechanickým a chemickým poškozením. Mezi nejpoužívanější materiály typu termoset patří epoxidové, fenolformaldehydové a polyesterové pryskyřice. Mezi používané materiály typu termoplast patří PTFE nebo polyimidové pryskyřice.

Nejpoužívanějšími organickými substráty jsou **FR-2**, **FR-3** a **FR-4**. Označení FR – *Flame Retardant* znamená v překladu nehořlavý. Jedním z důležitých a v dnešní době požadovaných parametrů je totiž samozhášivost.

Materiál **FR-2** je kombinace celulózového papíru a fenolformaldehydové pryskyřice. Je využíván u méně náročných aplikací. Je vhodný pro jednovrstvé a dvouvrstvé DPS.

Nevýhodou je navlhavost, horší mechanické vlastnosti a nízká odolnost vůči elektrickému oblouku.

Materiál **FR-3** je kombinace tvrzeného papíru a epoxidové pryskyřice. Je používán v náročnějších aplikacích místo FR-2, protože jeho výčet vlastností je lepší než u FR-2.

Materiál **FR-4** je kombinací skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice. Má výborné mechanické, elektrické a teplotní vlastnosti, nízkou navlhavost a je používán tam, kde nevyhovují FR-2 a FR-3. Je 2x dražší než FR-2.

Materiál **CEM-1** je kompozitní materiál, který má nejméně dva materiály výztuže a jejich pojivem je epoxidová pryskyřice. Jádrem je z celulózového papíru a to je chráněno skelnou tkaninou. Vlastnosti tohoto materiálu jsou někde mezi materiálem FR-3 a FR-4. [5]

Srovnání těchto materiálů je v tab. 2.

Tab. 2 Vybrané vlastnosti organických substrátů [1] [5]

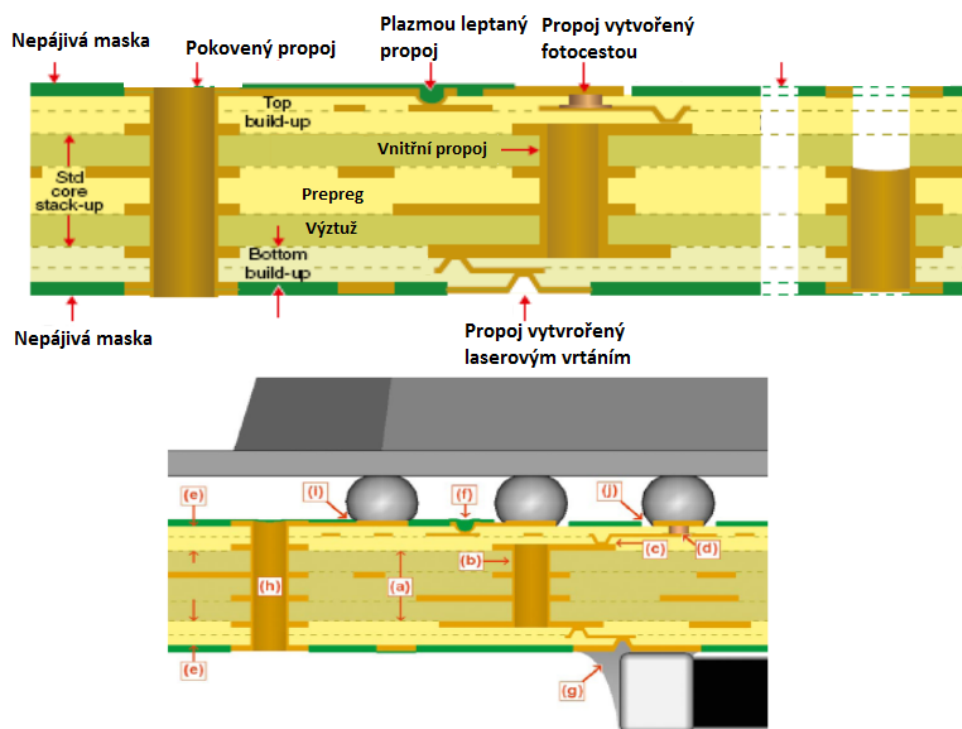
Parametr/Materiál	FR-2	FR-3	FR-4	CEM-1
Povrchový izolační odpor [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$1 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{11}$
Vnitřní izolační odpor [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$2 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{13}$
Permitivita (1 MHz)	4,7	4,9	4,7	4,7
Ztrátový činitel [%] (1MHz)	0,047	0,041	0,019	0,031
Elektrická pevnost [kV/mm]	60-70	60-65	35-65	-
Tepelná vodivost [$\text{J/s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$]	0,24	0,23	0,25	-
TCE [ppm/K]	11	13	11	-
Teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]	105	110	130	130
Absorpce vlhkosti [%]	0,8	0,75	0,35	-

Některé základní materiály mohou být i ohebné. Jedná se o materiály na bázi polyesterů a polyimidů.

- Polyimidy (PI), jejichž nejznámějším zástupcem je Kapton, trvale odolávají teplotě až 260°C a krátkodobě až 500°C . Mají vynikající tvarovou stálost a odolávají většině chemikáliím. Nevýhodou je jejich obtížné zpracování, které je zapříčiněné vysokou teplotou měknutí, a proto jsou poměrně drahé. Tloušťka je 25 – 75 μm .

- Polyestery (PE), jejichž zástupcem je Mylar, jsou levnější než Kapton, ovšem jejich teplotní stálost je do 175°C. Jsou odolné proti chemikáliím, vnějším vlivům a má výborné elektroizolační vlastnosti. Tloušťka je 75 – 125 µm.

Trendy směřují k nárůstu počtu vývodů a vodivých cest při současné miniaturizaci. Výsledkem je vývoj vícevrstvé DPS (obr. 9). Strukturu VV DPS tvoří kostra, na níž se střídají izolační a vodivé vrstvy. Kostrou vícevrstvé DPS je jednostranně či oboustranně plátovaný materiál o tloušťce cca 0,2 – 0,7 mm. Mezi vodivými vrstvami jsou takzvané lepící listy (*prepregs*), které mají tloušťku cca 0,05 – 0,18 mm a mají izolační vlastnosti. Propojení vodivých vrstev je realizováno propoji (*via*), respektive mikropropoji (*microvia*) v technologii HDI, jejichž průměr je menší než 150 µm. Propoje jsou realizovány převážně laserem, ovšem mohou být vytvořeny i fotocestou, vrtáním nebo leptáním. Podle umístění mohou být vnitřní, průchozí nebo slepé.



Obr. 9 Průřez DPS s vyobrazenými typy propojů [3]

Technologie HDI – *High Density Interconnection* je vícevrstvá DPS s vysokou hustotou propojení. Technologie je založena na již zmíněných mikropropojích, jejichž průměr je menší než 150 µm. Oproti běžným DPS dochází ke snížení váhy, velikosti a počtu vrstev na DPS.

1.2.3. Anorganické základní materiály

Skupinu anorganickým materiálů tvoří keramické materiály. V elektrotechnice jsou využívány např. v tenkovrstvé a tlustovrstvé technologii. Oproti organickým substrátům vynikají lepšími mechanickými a elektrickými vlastnostmi a výrazně vyšší teplotní odolností. Používají se především v lékařství, letectví či vojenské technice a to z důvodu vysokých nároků na spolehlivost.

Značnou nevýhodou jsou složité způsoby dělení. Keramické substráty se vyrábí ve standardních rozměrech a tvarech, např. čtverec 50 mm x 50 mm. Existují dvě rozšířené metody dělení keramiky. První a levnější metoda je mechanické dělení diamantovým nebo kovovým hrotem. Jedná se o levnou variantu, která je ovšem velmi nepřesná a nelze ji tedy pro některé aplikace použít. Druhá metoda je stříhání pomocí laseru. Tato metoda je výrazně přesnější a lze ji, na rozdíl od předchozí metody, použít v sériové výrobě. Nevýhodou je ovšem technologická náročnost, která se odráží na ceně. [6]

Nejrozšířenějšími materiály jsou korundová keramika Al_2O_3 , Beryliová keramika BeO_2 a nitrid hliníku AlN . Porovnání vlastností těchto materiálů je uvedeno v tab. 3:

Tab. 3 Porovnání vybraných vlastností anorganických materiálů [6]

Parametr/Materiál	96% Al_2O_3	99,5% Al_2O_3	99% BeO	AlN
Permitivita (1 MHz)	9	10	6,6	9-10
Ztrátový činitel [%] (1MHz)	0,55	0,08	0,04	7-20
Měrný odpor [$\Omega \cdot \text{mm}$]	$7 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$	$>1 \cdot 10^{13}$
Elektrická pevnost [kV/mm]	8	9	14	12
Tepelná vodivost [$\text{J/s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$]	35	37	250	175
Součinitel teplotní roztažnosti [ppm/K]	6,4	6,6	5	4,5

Zvláštní skupinu tvoří technologie LTCC – Low Temperature Co-fired Ceramic. Jedná se o keramiku vypalovanou při nízké teplotě $<850^\circ\text{C}$. Keramika je dodávána v podobě fólie, která je velmi flexibilní, křehká a náchylná na poškození. Fólie je složena z anorganické složky (sklo, keramika), která udává výsledné vlastnosti substrátu po výpalu, a organické složky,

kteřé mimo jiné zajišťují soudržnost anorganického prášku ve formě fólie. Použité materiály určují nejen parametry výsledné struktury, ale i výrobní podmínky. Podle zdroje [7] je složení LTCC keramiky 40% Al_2O_3 , 45% SiO_2 a 15% organická složka. Výhodou metody LTCC je nízká teplota výpalu, současné vytváření několika vrstev výsledné 3D struktury a tím získaná úspora času technologické výroby.

1.3. Pouzdra a jejich rozdělení

Pouzdra a pouzdřicí hmoty tvoří ochrannou „schránku“ polovodičových čipů, elektronických součástek a integrovaných obvodů. Chrání je před mechanickými a chemickými vlivy okolního prostředí, odvádí přebytečné teplo a tvoří elektrickou izolaci.

Podle materiálu pouzdřicí hmoty a spolehlivosti lze rozdělit pouzdra na:

- Hermetická (kovy, keramika, sklo)
- Nehermetická (organické materiály – polymery)

Volba vhodného typu pouzdra a metody pouzdření závisí na parametrech pouzdřené části, spolehlivosti a ceně. Levné obvody nekladou příliš velký důraz na spolehlivost, proto jsou často pouzdřeny v nehermetických pouzdrech. Technologie výroby pouzder jsou cenově i technicky dostupné. V opačném případě, kdy je zapotřebí vysoká spolehlivost, jsou k dispozici pouzdra hermetická. Jejich výroba je však technologicky náročná a od toho se odvíjí i cena takového pouzdra.

1.3.1. Hermetická pouzdra

Hermetická pouzdra jsou plynotěsná a odolná vůči vlhkosti a vnějším chemickým vlivům. Nejčastěji se jedná o kovová nebo keramická pouzdra, která vykazují vyšší spolehlivost než pouzdra nehermetická. Z toho důvodu jsou rozšířena především v lékařské, letecké či například ve vojenské technice. Díky dobré tepelné vodivosti jsou také využívána pro výkonové aplikace. [3]

1.3.2. Nehermetická pouzdra

Do skupiny nehermetických pouzder patří plastová pouzdra. Díky své nízké ceně, všestrannosti a snazší automatizaci tvoří přibližně 95% trhu s pouzdry. Existují však i nevýhody, mezi které patří např. nízká doba skladovatelnosti pouzdřících materiálů. Výsledné vlastnosti pouzdra jsou výrazně ovlivněny historií teplot a celkovou dobou skladování. Aby se docílilo co nejdelší životnosti, jsou tyto materiály uchovávány při nízkých teplotách.

Většina používaných materiálů je na bázi pryskyřic se složkami zajišťující vazební, vytvrzovací a samozhášivé vlastnosti. Typickými představiteli jsou epoxidové, silikonové a polyuretanové pryskyřice. [14]

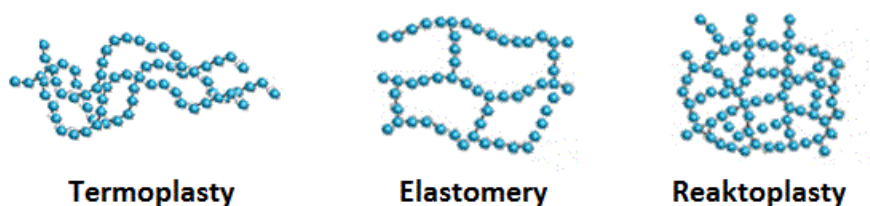
Obecně lze materiály plastových pouzder rozdělit do tří skupin:

- Termosety
- Termoplasty
- Elastomery

1.4. Materiály pro nehermetická pouzdra

Plastové materiály se vyznačují polymerní vazbou. Jedná se o dlouhé řetězce složené z mnoha malých částí nazývaných monomery. Existují tři typy plastů, mezi které patří termoplasty, reaktoplasty a elastomery a jsou znázorněny na obr. 10.

Termoplasty se vyznačují řetězově zesíťovanou strukturou a jejich charakteristickou vlastností je zpětná monomerizace při působení tepla. Reaktoplasty se vyznačují křížově zesíťovanou strukturou a na rozdíl od termoplastů je nelze zpětně monomerizovat. Posledním typem jsou elastomery, které mají velmi volné zesíťování a jejich předností jsou elastické vlastnosti. [16]



Obr. 10 Struktury plastových materiálů [16]

1.4.1. Epoxidová pryskyřice

Mezi nejpoužívanější materiály patří epoxidy neboli epoxidové pryskyřice, které patří mezi reaktoplasty. Přehled používaných materiálů je uveden v tab. 4. Vznikají reakcí monomerů za vzniku dlouhých řetězců, které jsou vzájemně propojeny a tvoří tzv. makromolekuly. Výroba začala již během druhé světové války. V současnosti se vyrábí mnoho druhů epoxidů, které jsou dodávány ve formě jednosložkových a dvousložkových zalévacích hmot a lepidel. [12]



Obr. 11 Obvod zalitý v epoxidu [31]

Epoxidy jsou vytvrzovány teplem, tlakem a katalyzátory. Aby materiál plnil standardy hořlavosti a byl odolný vůči absorpci vlhkosti, používají se příměsi boru. Nevýhodou však je, že bor je toxický materiál. Vzhledem k ekologickým nárokům na materiály představují epoxidy s příměsí boru riziko a budou se zřejmě nahrazovat jinými netoxickými materiály. [12]

Tab. 4 Vybrané vlastnosti epoxidových pryskyřic [38]

Parametr/materiál	ER2188	ER2220	ER1450	ER1122
Forma	Epoxidová pryskyřice	Epoxidová pryskyřice	Epoxidová pryskyřice	Epoxidová pryskyřice
Barva	Černá	Šedá	Bílá	Černá
Teplotní rozsah [°C]	-40 – 120	-40 – 130	-50 – 130	-50 – 150
Tepelná vodivost [W/m·K]	0,91	1,54	0,20	0,20
Relativní permitivita [50Hz]	4,0	6,0	4,7 (10kHz)	4,5
Izolační odpor [Ω]	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{12}$
Skladovatelnost	24/18 měsíců	24/18 měsíců	24 měsíců	24 měsíců

Epoxidové pryskyřice mají žlutohnědé zbarvení a vynikají výbornou mechanickou, tepelnou, chemickou a elektrickou pevností. Mají vynikající adhezni vlastnosti a to i k těžko lepitelným povrchům, jako jsou reaktoplasty, kovy, lamináty, keramika aj. Spoje tvořené epoxidovými lepidly jsou velmi pevné a srovnatelné se spoji svařovanými. Epoxidy odolávají teplotám v rozmezí od -50°C do 150°C a jsou odolné i vůči působení chemických látek, jako jsou alkoholy, hydroxidy nebo zředěné kyseliny. Horší odolnost ovšem vykazují při použití acetonů, esterů a chlorovaných uhlovodíků. Co se týče elektrických vlastností, disponují dobrou elektrickou pevností a vysokou hodnotou povrchového odporu. Nevýhodou je frekvenční závislost permitivity a činitele dielektrických ztrát. [17]

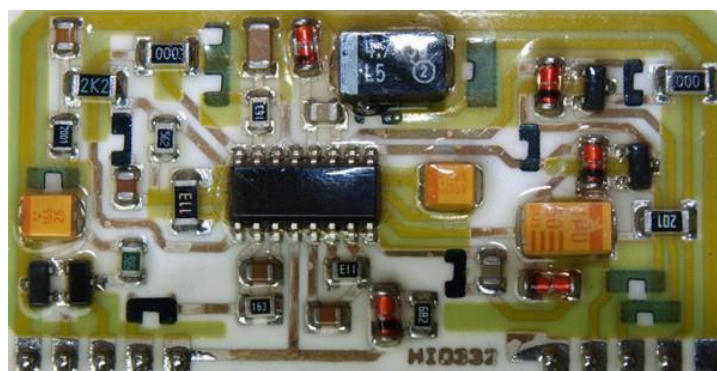
1.4.2. Silikony

Jedná se o organokřemičité sloučeniny tvořené křemíkem a kyslíkem (Si-O-Si). Patří do třídy reaktoplastů. Vyrábí se dvěma metodami – Grignardovou syntézou a přímou syntézou.

Zalévací silikonové hmoty mají kromě ochrany systému také funkci odvodu tepla. Vyrábí se v mnoha formách. Např. ve formě ochranného laku, lepidla či pasty. Mohou být jednosložkové nebo dvousložkové. V tab. 5 je výčet vlastností silikonových materiálů.

Ochranné silikonové laky jsou nanášeny ve velmi tenké vrstvě, tak, aby pokryly desku plošných spojů, cesty a součástky. Pro co nejlepší adhezi je nutné lakovaný povrch očistit od mastnoty a jiné kontaminace. Chrání součástky před vlhkostí, chemikáliemi a korozi.

Laky jsou čiré, ale obsahují stopu, která je viditelná pod UV světlem. Nanášejí se stříkáním, natíráním nebo ponořením a vytvrzují se teplem, UV zářením nebo volným zasycháním.



Obr. 12 Silikonový ochranný lak aplikovaný na DPS [32]

Silikony ve formě lepidla jsou vhodné pro trvalé spojení a následné odvádění přebytečného tepla. Jako příklad lze uvést přilepení chladiče k součástce. Výhodou je například absence upevňovacích šroubů, rovnoměrné roztečení lepidla po povrchu součástky s absencí vzduchových mezer a tím zvýšení efektivity odvodu přebytečného tepla součástky.

Další formou jsou silikonové pasty. Aplikace a vlastnosti jsou velmi podobné lepidlům. Lze je rovnoměrně nanést na nerovné povrchy, čímž efektivně odvádí teplo a na rozdíl od lepidel se dají lehce odstranit a umožnit tak lepší opravitelnost. [17] [18]

Tab. 5 Vybrané vlastnosti silikonových materiálů [18]

Parametr/materiál	SC 2001	SC 2003	SC 3001	DCA
Forma	Silikonová pryskyřice	2 - složková silikonová pryskyřice	Silikonová pryskyřice	Ochranný povlak
Barva	Tmavě šedá	Tmavě šedá	Čirá	Čirá
Teplotní rozsah [°C]	-50 – 200	-60 – 200	-60 – 200	-70 - 200
Tepelná vodivost [W/m·K]	0,6	0,8	0,2	-
Relativní permitivita [1MHz]	3,1	3,2	3,0	3,95
Izolační odpor [Ω]	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$
Skladovatelnost	12 měsíců	24 měsíců	12/24 měsíců	36 měsíců

Silikony disponují velmi dobrou tepelnou stabilitou. Odolávají teplotám v rozmezí - 60°C – 200°C a krátkodobě odolají i teplotám do 350 °C. Vynikají výbornými adhezními schopnostmi, odolností vůči chemickým a oxidačním vlivům, elektroizolačními vlastnostmi, elektrickou pevností, jsou pružné, odolné proti UV záření a jejich dielektrické vlastnosti se mění jen minimálně s teplotou a frekvencí.

Jedná se o fyziologicky inertní materiály. Jsou bez chuti a zápachu, odolné vůči působení ozónu a patří mezi nejméně toxické polymery. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena oproti jiným polymerům, která je způsobena nákladnou a náročnou výrobou. [17] [18]

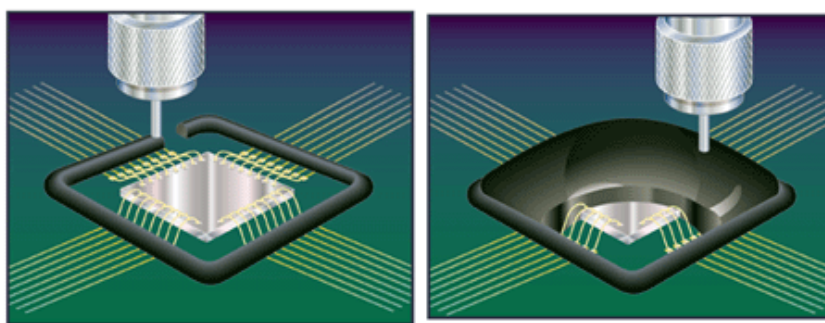
1.5. Technologie výroby nehermetických pouzder

Mezi nejrozšířenější technologie patří:

- Zalévání
- Lisování
- Fluidizace

1.5.1. Zalévání

Jedná se o jednoduchou, rychlou a poměrně levnou metodu pouzdření. Lze zalévat elektronické součástky, integrované obvody, celé elektronické sestavy nebo pouze samotné čipy („Glop Top“). Dnešní technologie jsou schopné vytvářet i spodní výplně pod pouzdry BGA. Tato metoda nese označení „Underfilling“. Obr. 13 zachycuje metodu zalévání čipu. [1]



Obr. 13 Zalévání samotného čipu (metoda Glop Top) [3]

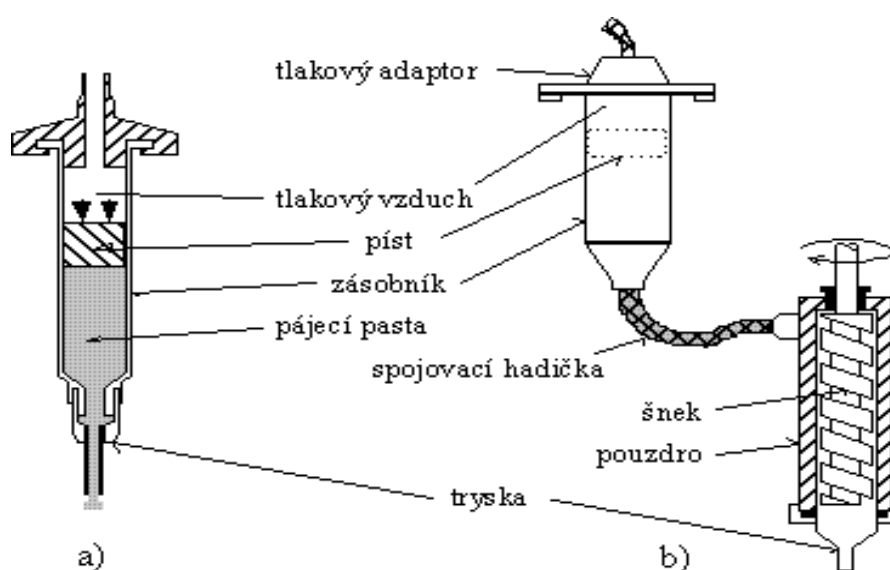
Zařízení pro dávkování definovaného množství pouzdřicího materiálu se nazývá dispenzer. Princip zařízení spočívá v přenosu pouzdřicí hmoty ze zásobníku do dávkovací jehly a následné nanesení na definované místo. Principy funkce dispenzeru jsou různé a lze je rozdělit na:

- Tlakové nanášení s definovanou dobou
- Nanášení prostřednictvím rotačního čerpadla
- Lineární nanášení

Tlakové nanášení pracuje na principu tlakového dávkování materiálu po dobu, kdy je otevřen tlakový ventil. Tlak vzniká působením stlačeného vzduchu na hmotu v zásobníku,

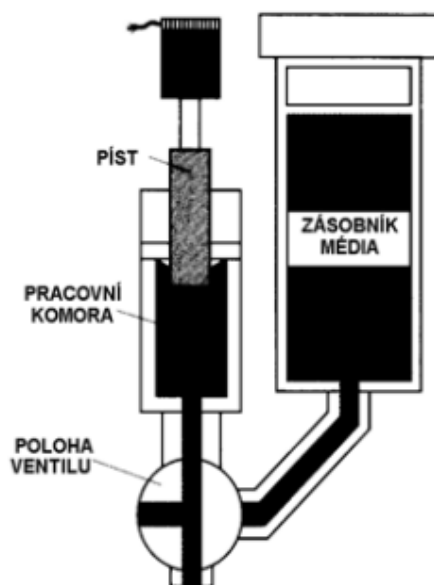
kterou tlačí do dávkovací hlavice. Metoda je vhodná pro ruční nebo poloautomatické nanášení pouzdríci hmoty.

Metoda nanášení prostřednictvím rotačního čerpadla je odlišná. Na pouzdríci hmotu v zásobníku působí nízký konstantní tlak, který je dostatečný proto, aby byla hmota vtlačena do šroubovitého vřetene v dávkovací hlavě dispenzeru, ale nedostatečný pro vytlačení hmoty z dávkovací hlavy. Princip spočívá v pootáčení šroubovitého vřetene (šnekového čerpadla) po dobu sepnutí elektromagnetické spojky, která přenáší točivý moment ze stejnosměrného motoru právě na vřeteno. Nanesená dávka materiálu tedy odpovídá době sepnutí elektromagnetické spojky. [5]



Obr. 14 a) Tlakové nanášení s definovanou dobou. b) Nanášení prostřednictvím rotačního čerpadla [5]

Metoda lineárního nanášení, která je viditelná na obr. 15, je založena na přetlačení pouzdríci hmoty ze zásobníku do pracovní komory. Ventil tedy musí otevřít cestu od zásobníku do pracovní komory. Pouzdríci hmota je dále vytlačena působením pístu, který je programově řízen servomotorem, přes ventil do hlavice. Ventil musí být v tomto okamžiku otočen do polohy, kdy je pracovní komora a hlavice dispenzeru průchozí. [5]



Obr. 15 Lineární dispenzer [5]

1.5.2. Lisování

Ve velkosériové výrobě plastů je metoda lisování nejrozšířenější. Lisovat lze dvěma způsoby:

- Tlakovým vstřikováním pouzdrící hmoty do dutiny
- Lisování a přetlačování pouzdrící hmoty do dutiny

Výrobky zhotovené **vstřikováním** se vyznačují velmi dobrou rozměrovou stálostí i vysokou přesností. Vstřikováním lze zpracovat téměř všechny druhy termoplastů a některé druhy reaktoplastů a kaučuků.

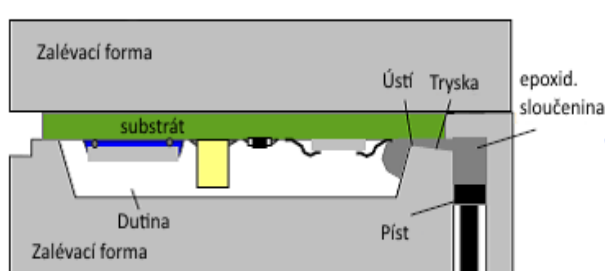
Proces vstřikování je následující. Materiál ve formě granulí je nasypán do násypky, odkud je „šnekem“ nebo pístem přemístěn do tavicí komory, kde za současného působení tlaku a tření dochází k tavení materiálu. Působící tlak bývá v rozmezí 50 – 100 MPa. V případě předehtání plastového materiálu lze tento tlak snížit. Tavenina je následně vstřikována do dutiny kovové formy, kde na ni působí takzvaný „dotlak“, který snižuje rozměrové změny, a tavenina chladnutím přechází do plastického stavu.

Mezi faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu vstřiku patří druh použitého materiálu, technologický postup, konstrukce formy a vstřikovací zařízení. [15]

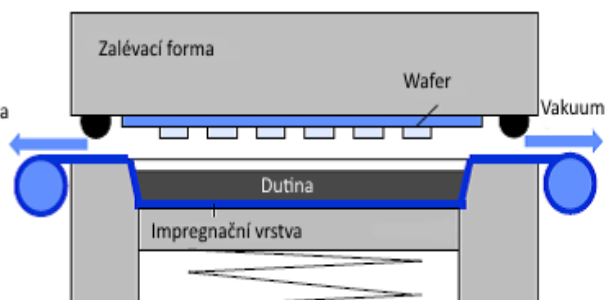
Lisování je metoda tváření převážně reaktoplastů ve vyhřáté ocelové formě za působení tlaku. Do dutiny formy je vložen plastický materiál o definovaném množství, který v důsledku kontaktu s vyhřívanou formou, jejíž teplota bývá v rozmezí 130 – 190 °C, přechází do plastického stavu. Na hmotu působí tlak tvárníku, který podporuje plastikaci a současně vyplňuje rovnoměrně celou dutinu. Lisovací tlak bývá v rozmezí 10 – 60 MPa. Hranice mezi nízkotlakým a vysokotlakým lisováním je 3,5 MPa. Následuje snížení tlaku tvárníku, čímž je zajištěno odplynění taveniny plastu. Působením tepla na taveninu dochází ke zdlouhavému procesu vytvrzování plastu. Doba vytvrzování je ovlivněna především druhem použitého materiálu, tloušťkou vrstvy a teplotou formy.

Mezi faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu lisování tedy patří druh použitého materiálu, geometrie výrobku a lisovacího zařízení, lisovací tlak, teplota lisování a doba vytvrzování.

V současnosti jsou tyto metody nahrazovány metodou vstřikování [15]



Obr. 16 a) Metoda vstřikování [15]



b) Metoda lisování [15]

1.5.3. Fluidizace

Jedná se o technologický proces, při kterém se prachové částice pouzdrícího materiálu usazují na povrchu pouzdřeného vzorku. Jemný prášek je vystaven současnému působení vzduchu a vibrací, čímž dochází k vytvoření tzv. „fluidu“. Fluidum je terminologie, kterou se označuje stav, při kterém získávají jemné prachové částice hmoty vlastnosti kapalin.

Ve fluidizačním zařízení jsou jemné práškové částice plastické hmoty, termosetu, umístěny v zásobníku nádoby (tzv. lodičky) s perforovaným dnem, kterým do nádoby proudí vzduch. Proudící vzduch přivádí částice do expandovaného stavu, který je označován právě jako fluidum.

Průtok vzduchu musí být nastaven tak, aby byly drobné částice vymršťovány z pracovního prostoru jen natolik, aby nepřesáhly okraj pracovního prostoru, ale zároveň dostatečně, aby uvedl prachové částice do fluidizovaného stavu.

Do vytvořeného fluida je vložen předehřátý substrát se součástkami. Předehřev je dalším důležitým parametrem tohoto procesu. Na předehřátý vzorek se usazují prachové částice a tím vytváří ochranný povlak součástky. Prvotní vložení vzorku do „fluidu“ trvá řádově jen několik sekund, poté je nutné součástku vyjmout a znovu ohřát. Opětovným ohřátím dojde k úplnému roztavení a slití termosetu, čímž dojde k vyrovnání povrchu. Celý proces fluidizace se opakuje, dokud není vrstva pouzdrícího materiálu dostatečně velká.

Je-li pouzdrěný obvod vložen do pracovního prostoru příliš chladný, nedojde k usazení prachových částic termosetu na jeho povrchu. V případě, že je obvod naopak příliš zahřátý, může dojít k roztavení pájecí slitiny a drátové vývody, za které je obvod uchycen, mohou odpadnout a obvod propadne do fluidizační komory. [1]

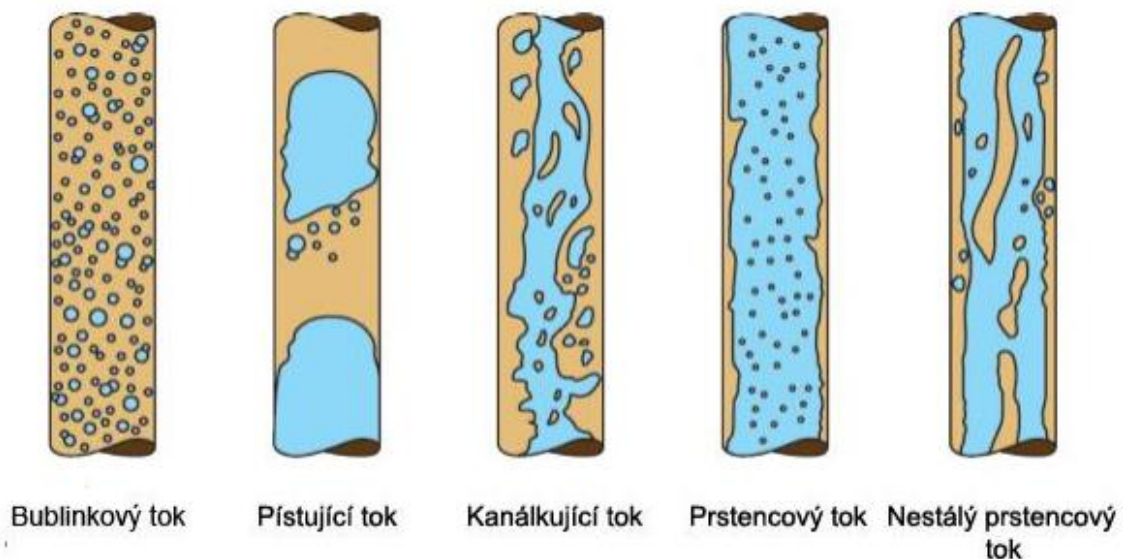
Faktory ovlivňující vytvoření ideálního fluida:

1. Vibrace - slouží k vytvoření rovnoměrné hladiny nadnášeného prášku a brání tvorbě nežádoucích gejzírů, které mohou vznikat průchodem vzduchu
2. Vzduch - nadnáší jemný prášek a tím vytváří požadované fluidum. Nedostatek vzduchu způsobuje nežádoucí vysokou hustotu fluidu a naopak příliš mnoho vzduchu vytváří gejzíry a nadměrnou prašnost.

3. Velikost prachových částic – Pro vytvoření konzistentního povlaku pouzdřícího materiálu musí být zachována požadovaná velikost prachových částic.

V praxi se můžeme setkat několika druhy fluidních vrstev. Z níže uvedeného výčtu je žádoucí pouze vroucí vrstva. Další, nežádoucí typy, mohou vznikat v důsledku různorodé velikosti částic či přítomnosti vlhkosti, z čehož může plynout nízká kvalita rozptylu částic a nanášená vrstva může být nerovnoměrná. Výčet různých druhů vrstev je následující [35]:

- Vroucí fluidní vrstva (klidná hladina nenarušovaná bublinami)
- Kypící fluidní vrstva (tryskání a velké bubliny, intenzivní směšování)
- Pístující fluidní vrstva (v úzkých nádobách tvoří bubliny shluky podobné pístům)
- Kanálkující fluidní vrstva (ve vlhkém materiálu se částice nenadnáší rovnoměrně, ale tvoří kanálky)
- Třídící fluidní vrstva (malé a lehké částice se drží u hladiny, zatímco větší a těžší u dna)



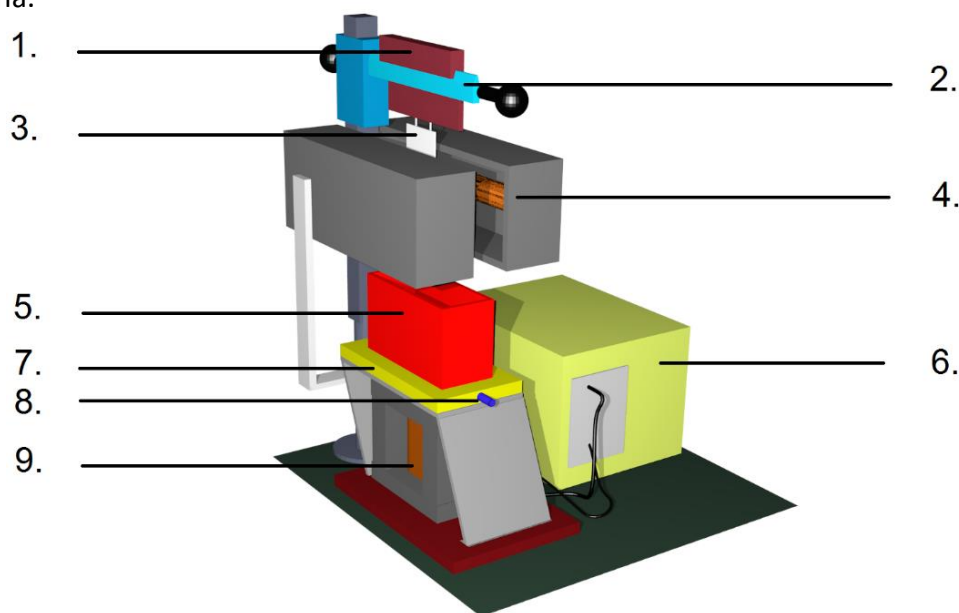
Obr. 17 Druhy fluidních vrstev [35]

2. Popis fluidizačního zařízení

Na obr. 18 je grafická podoba fluidizačního zařízení využívaného pro pouzdření součástek. Jedná se o zařízení vlastní výroby a je tedy vhodné pro menší série.

Princip činnosti je následující. Pouzdřená součástka je prostřednictvím drátových vývodů uchycena v nosiči (1.). Ten se zavěsí na výškově nastavitelné rameno, kterým lze nastavit polohu součástky (2.).

Součástku je nutné nejdříve přehřát v prostoru topného tělesa (4.). Ohřátá následuje do termosetového fluidu ve fluidizačním prostoru (5.). „Vanička“ disponuje perforovaným dnem (7.), kudy je přiváděn vzduch, který nadnáší prachové částice. Zároveň je umístěna na transformátoru (9.), který vibracemi vytváří rovnoměrnou hladinu vytvořeného fluidu. Součástka je ohřívána a vkládána do fluidu opakovaně, dokud není nanesená vrstva dostatečná.



Obr. 18 Podoba fluidizačního zařízení

- | | |
|--------------------------------------|--------------------|
| 1. Nosič pouzdřené součástky | 6. Zdroj napájení |
| 2. Výškově nastavitelné nosné rameno | 7. Perforované dno |
| 3. Pouzdřená součástka | 8. Přívod vzduchu |
| 4. Tepelné těleso – přehřev | 9. Zdroj vibrací |
| 5. Fluidizační prostor – vanička | |

2.1. Materiály vhodné pro fluidizaci

Kapitola je zaměřena na vlastnosti používaných materiálů při realizaci fluidizovaných pouzder. Musí splňovat několik kritérií, mezi které patří rovnoměrné nanášení, odolnost vůči environmentálním a chemickým vlivům, složení by nemělo být zdravotně závadné (VOC free), dobré izolační vlastnosti aj..

Pro úspěšnou aplikaci práškových epoxidů na pouzdřenou součástku či integrovaný obvod je nutné dodržet několik technologických kroků:

1. Je nutné dobře očistit a odmastit povrch, aby byl bez známek oxidace či koroze.
2. Pouzdřenou součástku je nutné předehřát. Předehřev může probíhat v indukčních, radiálních nebo odporových pecích a slouží k předehřátí i vytvrzení epoxidu.
3. Nanesení pryskyřice. Na předehřátém vzorku se nanese pryskyřice roztaví a částečně rozlije. Výsledná tloušťka závisí na teplotě předehřátého vzorku, době namáčení a viskozitě pryskyřice v roztaveném stavu.
4. Vytvrzení pryskyřice. Je-li vytvrzovaný vzorek velký, může k vytvrzení pryskyřice stačit naindukované teplo z předehřevu. Je-li vzorek malý, uniká teplo rychleji, proto je nutné provést vytvrzení v peci.

Tab. 6 a tab. 7 nabízí srovnání vlastností práškových pryskyřic 3M Scotchcast společnosti 3M a pryskyřic společnosti SolEpoxy.

Tab. 6 Práškové pryskyřice 3M Scotchcast společnosti 3M [36]

Vlastnosti /obchodní značení	260	5133	5230N	5388
Barva	Zelená	Modrá	Světle modrá	Modrá
E_p [kV/mm]	40	19,7	40	44
Izolační odpor R [Ω]	10^{15}	10^{15}	10^{14}	10^{14}
Krytí ostrých hran	35 – 40 %	15 – 25 %	>35 %	35 %
Předehřev	150 – 260 °C	149 – 246 °C	177°C 10 min	177°C 10 min
Vytvrzování	149°C 30 min	149°C 30 min		
Měrná hmotnost	1,43	1,45	1,60	1,57
Skladovatelnost	24 měsíců >27 °C	24 měsíců >27 °C	24 měsíců >16 °C	18 měsíců >16 °C

Tab. 7 Práškové pryskyřice společnosti SOLEPOXY [37]

Vlastnosti /obchodní značení	DK18-05	DK18-0955	DK18-2100
Barva	Černá	Oranžová	Světle modrá
Elektrická pevnost E_p [kV/mm]	1,01	1,17	-
Izolační odpor R [Ω]	$15 \cdot 10^{13}$	10^{15}	10^{14}
Přehřev Vytvrzování	110 – 180 °C 150°C 30 min	150°C 30 min	110 – 180 °C 150°C 30 min
Měrná hmotnost	1,6 – 1,7	1,72	1,6
T _g [°C]	115 - 120	101	120
$\alpha/10^{-6} K^{-1}$	40 - 70	33	-
Třída	2 a 3	3	1
Skladovatelnost	12 měsíců 10°C 6 měsíců 21°C	12 měsíců	12 měsíců 10°C 6 měsíců 21°C

3. Vlhkost, teplota a jejich vliv na elektronická zařízení

Vlhkost a teplota patří mezi nežádoucí vlivy, které působí na elektronické součástky a zařízení. Důsledky jejich působení jsou různé. Současné působení relativní vlhkosti a teploty vzduchu mohou při dostatečné intenzitě způsobit podstatné změny vlastností materiálů a to může ohrozit správnou funkci elektronických zařízení.

Působí-li na zařízení zvýšená teplota společně se zvýšenou vlhkostí, dochází ke zvýšení tlaku vodních par a k urychlení difúze těchto par do přítomných materiálů.

Při působení tepla a střídání vlhkého a suchého okolního prostředí může materiál pojmout více vlhkosti než při stálém působení průměrné vlhkosti a tím dochází k narušení vnitřní struktury materiálu, což vede k rychlejšímu zhoršení vlastností materiálu.

Pro naši zeměpisnou šířku je běžné působení vlhkosti a střídání teplot. Obsah vodních par ve vzduchu je vyjádřeno procentem relativní vlhkosti %RH. Je-li hodnota 100 %RH, obsahuje vzduch 100 % vodních par pro danou teplotu. S rostoucí teplotou roste i obsah vodních par ve vzduchu a naopak. Z toho plyne, že s rostoucí teplotou dochází k větší difúzi

vlhkosti do materiálu. Je-li naopak teplota nízká, dochází ke kondenzaci vody na povrchu materiálu.

Aby působení obou těchto vlivů mělo co nejmenší dopad na vlastnosti materiálů, nanáší na se povrch součástek a zařízení impregnační a elektroizolační laky, které tvoří ochranný povlak.

3.1. Tlustovrstvé senzory

S rostoucí integrací v elektronických obvodech je potřeba nahrazovat klasické součástky prvky menšími, s nízkými výrobními náklady a jednoduchou technologií. To vede k rozšiřování tlustovrstvých technologií, které mimo jiné pronikají i do vývoje a výroby senzorů.

Smyslem tlustovrstvé technologie je vytvoření filmu vhodného materiálu, nejčastěji ve formě pasty, na vhodný nosný materiál, jinak označovaný jako substrát. Nanesená pasta je následně tepelně vytvrzena.

Pasty pro tlusté vrstvy jsou nehomogenní směsi složené z několika složek:

- Funkční složka (elektrické vlastnosti)
- Tavidlová složka (viskozita)
- Adhezni složka (pojivo)

Pasta vzniká rozdrčením funkčního materiálu na prášek, který je vmíchán do pojivové matrice (polymery a rozpouštědla), která obsahuje mimo jiné i modifikační složky a složky pro vytvoření vazby na substrát (nizkotavná skla, keramika).

Pro výrobu teplotních a vlhkostních senzorů se používají běžné i speciální vodivé a odporové pasty. Tlustovrstvé senzory jsou tvořeny čtverci, resp. obdélníky o velikosti v řádu milimetrů. Jejich výhodou je schopnost past reagovat na podněty vnějšího okolí změnou některých svých parametrů. Díky malým rozměrům reagují poměrně rychle a jsou vhodné pro kontinuální měření teploty, případně i vlhkosti. Tlusté vrstvy jsou vysoce odolné a stabilní.

4. Metody měření

Vlhkost je neelektrická veličina, která negativně ovlivňuje funkci elektronických zařízení. Existuje několik metod měření této veličiny. Tato práce se zabývá zkoumáním odolnosti fluidizovaných pouzder vůči působení vlhka, proto budou pouzdra vystavena působení tepla a vlhkosti. Sledovanou veličinou bude změna rezistivity testovaných vzorků.

Zapouzdřené vzorky budou podrobeny působení zvýšené teploty a relativní vlhkosti. Jedna z metod, kterou bude hodnocena odolnost fluidizovaných pouzder vůči působení vlhkosti, je metoda hmotnostního zisku. Metoda spočívá v porovnání hmotnosti pouzdra vysušeného a pouzdra vlhkově namáhaného.

4.1. Metoda hmotnostního zisku

Průběh testovací metody je následující. Zapouzdřené vzorky je nejdříve nutné vysušit od počáteční vlhkosti. Vysušení probíhá 24 – 48 hodin při teplotě 125 °C. Vysušené vzorky se nechají 15 minut odstát a poté jsou zváženy. Naměřená hmotnost je označena jako suchá váha.

Následuje vložení testovaných vzorků do klimatické komory, kde budou podrobeny testům vlhkosti podle normy **ČSN EN 60068-2-67**. Po uplynutí 168 hodin v klimatické komoře budou vzorky vyjmuty a podrobí se měření hmotnosti. Po měření budou vzorky vráceny zpět do klimatické komory, kde zůstanou po zbytek z 504 hodin dlouhého vystavení působení tepla a vlhkosti. Po uplynutí 504 hodin budou vzorky vyjmuty z klimatické komory a změří se jejich aktuální hmotnost.

Výsledný hmotnostní zisk testovaných pouzder získáme dosazením dosažených výsledků do následujícího vzorce:

$$A_m = \frac{m_{vlhká} - m_{suchá}}{m_{vlhká}} \cdot 100 [\%]$$

4.2. Sledování změn rezistivity

Testovací vzorky jsou tvořeny TLV odporovými meandry na keramickém substrátu. Hodnota odporu vzorků bude vyhodnocena z úbytku napětí každého vzorku. Důvodem použití nepřímé metody, která spočívá v přepočtu elektrického napětí na elektrický proud, je ta, že při přímém měření odporu je výsledek ovlivněn o chybu měření převodníku.

$$R = \frac{U}{I} [\Omega]$$

Hodnoty odporu vzorků budou sledovány v následujících krocích: výchozí hodnota (před zapouzdřením), po zapouzdření (fluidizaci), po 168 hodinách teplotního a vlhkostního namáhání a po ukončení 504 hodin dlouhého teplotního a vlhkostního namáhání. Časové intervaly, ve kterých proběhne měření vzorků, odpovídají normované zkoušce testování elektronických součástek dle normy ČSN EN 60068-2-67. Získaná data elektrických odporů budou zpracována a statisticky vyhodnocena.

4.3. Norma ČSN EN 60068-2-67

Norma stanovuje standardní zkušební postup pro zrychlené vyhodnocení odolnosti malých elektrotechnických výrobků proti nepříznivým účinkům vlhkého tepla. Pro zkoušku je stanoveno několik doporučených dob při relativní vlhkosti 85 % a teplotě 85 °C. U součástek s pouzdrem z plastů je znehodnocení důsledkem absorpce vodní páry plastem a pronikání vlhkosti podél vývodů.

Zkušební komora musí být zkonstruována tak, aby se v ní mohly vytvořit podmínky teploty a relativní vlhkosti uvedené v tabulce tab. 8 po dobu nejméně 2000 hodin bez přerušení. Tolerance teploty se pohybuje ± 2 °C a ± 5 %RH.

Musí být použita destilovaná nebo deionizovaná voda s rezistivitou 0,5 M Ω ·cm při teplotě 23 °C. Hodnota PH musí být při teplotě 23 °C rozmezí 6 – 7,2.

Tab. 8 Stupně přísnosti klimatické zkoušky

Teplota [°C]	Relativní vlhkost [%]	Doba trvání zkoušky [h]			
		I	II	III	IV
85	85	168	504	1000	2000

5. Klimatická komora

Klimatická komora je zařízení, které dokáže v laboratorních podmínkách simulovat různé vlastnosti pracovního prostředí. Uplatnění našlo v průmyslu, ale také kupříkladu v biologii. V průmyslovém odvětví slouží k testování vlivu prostředí na různé materiály, komponenty nebo celá zařízení. Klimatické komory jsou hojně využívány ve vývojových a výzkumných zařízeních pro sledování chování materiálů, součástek a zařízení v podmínkách běžného provozu, ale i extrémních podmínkách. Předností klimatických komor je možnost sledovat chování materiálů v různých podmínkách již v etapě vývoje a tak lze jejich parametry upravit již v počátcích a tím uspořit čas a peníze.

Výčet podmínek, které lze v klimatické komoře simulovat:

- Extrémní teploty, teplotní výkyvy, teplotní šoky
- Vlhkost a relativní vlhkost
- Vystavení UV záření, elektromagnetické radiaci
- Vakuum
- Nadmořská výška
- Déšť, zvětrávání, koroze
- Elektrodynamické vibrace

Rozměry a vybavení klimatických komor se liší podle jejich uplatnění. Jednoduché komory mohou mít rozměry obyčejné krabice, zatímco u složitějších komor mohou rozměry nabývat parametrů bytových jednotek.

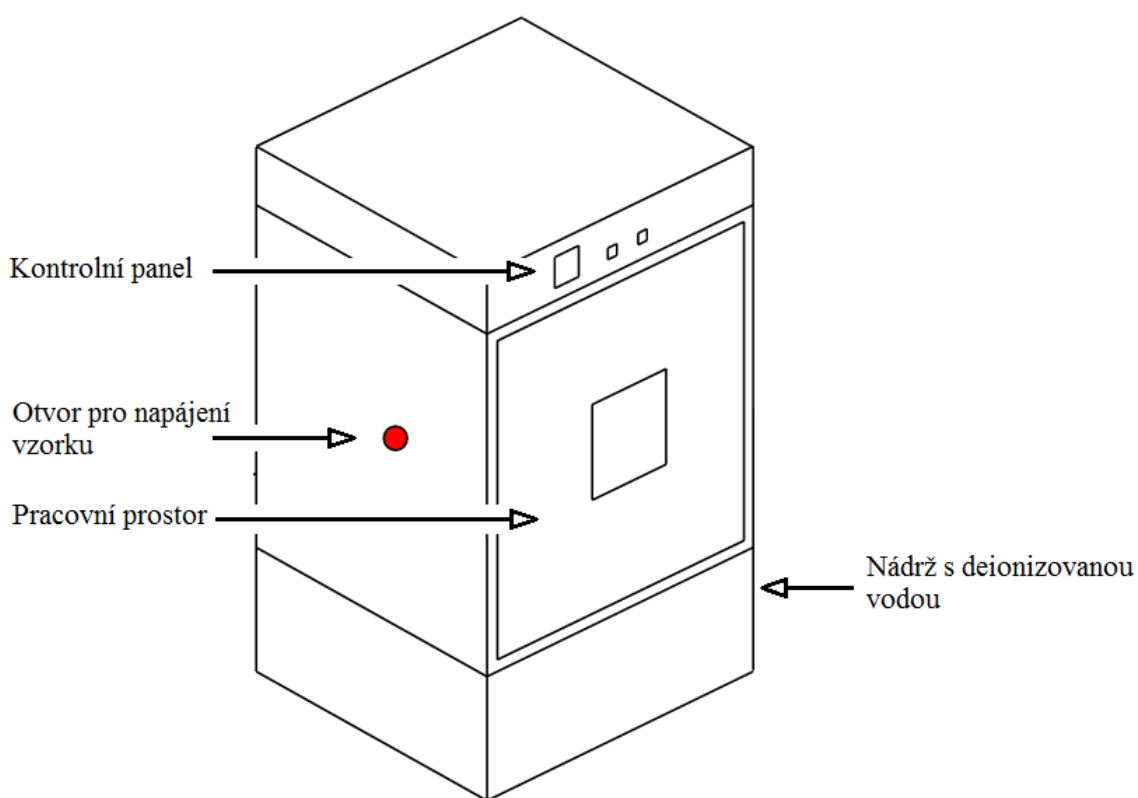
5.1. Klimatická komora Shjianheng SDH01

Jedná se o klimatickou komoru typu SDH01 firmy Shanghai Jianheng Instrument CO., Ltd. Typ SDH01 je základní model z rodiny „Temperature and humidity“, tedy rodiny zařízení zaměřených na simulování vlivu vlhkosti a teploty.

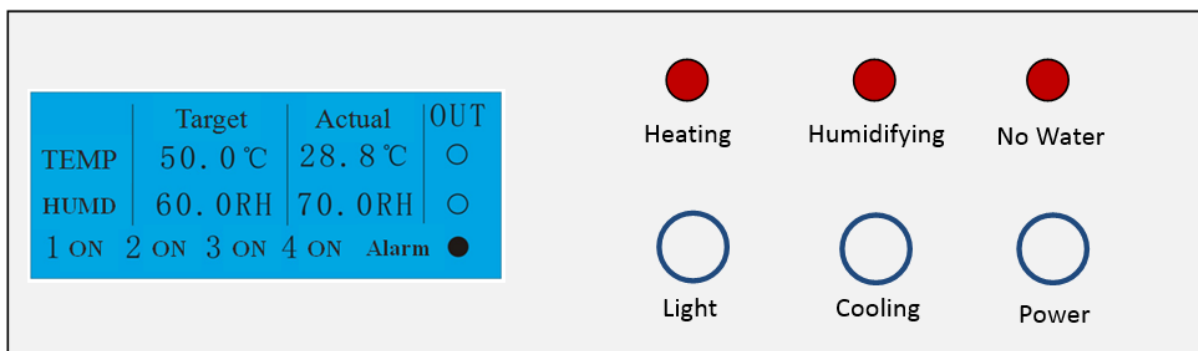
Parametry komory SDH01

Externí rozměry	88 x 68 x 124 cm
Rozměry pracovního prostoru	47 x 50 x 60 cm
Objem pracovního prostoru	150 l
Teplotní rozsah	0 ~ 100 °C
Rozsah vlhkosti	20 ~ 98 % R.H.
Chlazení	vzduchem
Výkon	1,5 kW
Napájení	220 V ± 22 V, 50 Hz

5.1.1. Popis komory



Obr. 19 Popis klimatické komory



Obr. 20 Detail kontrolního panelu

Komora má velmi intuitivní a jednoduché ovládání. Ovládací panel disponuje displejem, na kterém jsou zobrazeny nastavené a aktuální hodnoty teploty a relativní vlhkosti, dále třemi kontrolkami, které hlídají stav sepnutí či vypnutí ohřevu, vodního čerpadla a stav destilované vody v nádrži a třemi ovládacími tlačítky, kterými lze rozsvítit světlo uvnitř komory, zapnout chladicí ventilátor nebo vypnout a zapnout zařízení. Kontrolní panel je zachycen na obr. 20.

Teplotní a vlhkostní profil je kontinuální. Nastavení profilu spočívá v pouze v nastavení požadované hodnoty teploty a vlhkosti uvnitř komory. Dobu, po kterou je nastavený profil aktivní, nelze nastavit, takže komora bude aktivní, dokud nebude profil manuálně přenastaven nebo nebude komora vypnuta. Komora disponuje také alarmem, který hlídá stav vody v nádrži a teplotu topných těles. Je-li úroveň destilované vody nízká nebo překročí-li teplota topných těles doporučenou hodnotu, sepne se velmi intenzivní a pronikavý zvuk alarmu. Nedojde-li k žádnému zásahu obsluhy, komora se sama vypne.

Záleží také na správném uložení testovaných vzorků uvnitř komory. Je nutné vzorky umístit tak, aby kolem nich mohl cirkulovat horký vzduch. Na obr. 21 je vyobrazeno vhodné rozmístění velkých a malých vzorků uvnitř komory.



Obr. 21 Podoba vhodného a nevhodného uložení vzorků v pracovním prostoru

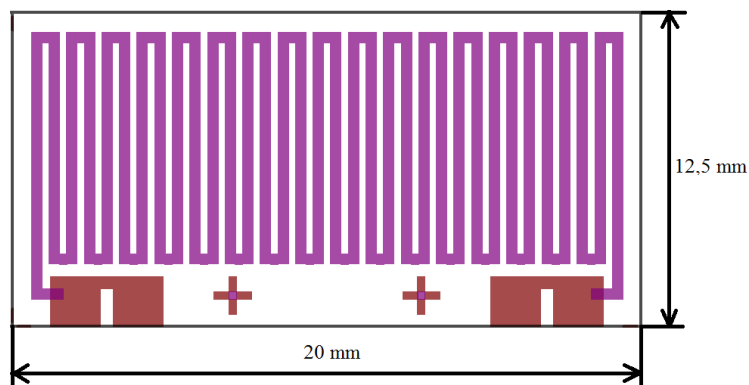
6. Experimentální část

Experimentální část projektu zahrnuje návrh a realizaci testovacích vzorků, senzorů, které budou následně zapouzdřeny do fluidizovaných pouzder. Cílem experimentu je vyhodnotit, zda jsou fluidizovaná pouzdra odolná vůči působení vlhkosti okolí. Vzorky budou testovány na působení tepla a vlhkosti podle dostupných norem ČSN. Získané informace budou zpracovány a vyhodnoceny v závěrečné zprávě.

6.1. Návrh testovacích vzorků

Pro testování odolnosti fluidizovaných pouzder vůči působení tepla a vlhkosti byly navrženy a realizovány testovací vzorky tvořené motivy odporových meandrů. Tyto meandry zastávají funkci senzoru. Motivy jsou nanесeny na substráty z korundové keramiky (Al_2O_3) a jsou vytvořeny technologií tlustých vrstev. Rozměry použitých keramických substrátů jsou 50,8 x 50,8 mm. Z jednoho substrátu je možné vyrobit až 8 testovacích vzorků.

Podoba testovacích vzorků byla navržena v návrhovém prostředí volně dostupného programu EAGLE. Na obr. 22 je podoba jednoho ze vzorků. Cílem testování je vliv působení tepla a vlhkosti na fluidizovaná pouzdra, proto mají motivy podobu odporových meandrů. Sledovanou veličinou je rezistivita, přesněji změna její hodnoty při působení vlhkosti. Některé vzorky budou navíc opatřeny filmem z dielektrického materiálu, který je na působení vlhkosti citlivější než odporový materiál. Podoba motivu byla navržena tak, aby splňovala návrhová pravidla tisku tlustých vrstev prostřednictvím sítotisku. Technologie tlustých vrstev je limitována několika faktory, mezi které patří parametry použitého síta a vlastnosti použitých past.



Obr. 22 Finální podoba jednoho ze vzorků

Pro tuto práci byly navrženy celkem 4 typy vzorků. Vzájemně se od sebe liší tloušťkou (0,4 mm, 0,5 mm) a orientací meandru (vertikální, horizontální). Hodnoty odporu navržených meandrů jsou zveřejněny v Tab. 9. Minimální izolační vzdálenost odpovídá 0,3 mm, vývodové plochy mají rozměr 2 x 2 mm a rozteč 2,54 mm, která odpovídá rozteči drátových hřebínkových vývodů.

Tab. 9 Vypočítané hodnoty odporu jednotlivých testovacích vzorků

Číslo odporu	Šířka [mm]	Délka [mm]	Velikost odporu [Ω]	
			10 Ω/\square	100 Ω/\square
R₁ - vertikální	0,4	$7,67 \cdot 10^2$	$7,67 \cdot 10^3$	$7,67 \cdot 10^4$
R₂ - vertikální	0,5	$5,26 \cdot 10^2$	$5,26 \cdot 10^3$	$5,26 \cdot 10^4$
R₃ - horizontální	0,4	$7,69 \cdot 10^2$	$7,69 \cdot 10^3$	$7,69 \cdot 10^4$
R₄ - horizontální	0,5	$5,65 \cdot 10^2$	$5,65 \cdot 10^3$	$5,65 \cdot 10^4$

6.2. Technologické kroky při výrobě vzorků

Vzorky jsou vyrobeny technologií sítotisku. Tato technika je často využívána při realizaci tlustých vrstev, kdy se metodou tisku přes síto nanáší jednotlivé typy past (vodivá, odporová, dielektrická, krycí). Tyto pasty tvoří pasivní síť hybridních integrovaných obvodů. Po nanesení následuje výpal, po kterém pasty získávají výsledné vlastnosti.

Výroba testovacích vzorků probíhala v technologických laboratořích fakulty VUT.

6.2.1. Příprava a vrstvení síť

První krok spočívá ve vytvoření požadovaných motivů sítě. Pro tuto práci byla použita síť s jemností 325 mesh (počet otvorů sítě na palec). Dříve, než proběhne samotné vytváření motivů sítě, je nutné vytvořit šablony s požadovanými motivy. Šablony jsou tvořeny plastovým nosičem, na kterém je natištěn odpovídající motiv. Fakulta elektrotechniky nedisponuje odpovídající technologií pro výrobu šablon, proto jsem zvolil externího dodavatele G5 – studio s.r.o..

Příprava a vrstvení sítě probíhaly v následujících krocích:

- Očištění a odmaštění síťoviny
- Oboustranné nanesení přípravku pro zlepšení smáčivosti (Autotype Universal Mesh Preparing)

Následující technologické kroky probíhaly v prostoru temné komory:

- Ponoření sítě do deionizované vody. Síť je nutné vytahovat pomalu, aby voda zůstala mezi oky sítě a tvořila film. Povrch sítě musí být bez viditelných nečistot.
- Přiložení kapilárního filmu Capillex CP na střed sítě. Film je nanášen tmavou stranou k síti a pomocí válečku je navalován.
- Sušení sítě a kapilárního filmu studeným proudem vzduchu po dobu 10 minut. Poté je nutné odstranit plastový nosič filmu a nanesenou vrstvu opticky zkontrolovat.
- Osvit sítě. Filmová předloha (šablona) je přiložena k síti a vycentrována. Následuje vytvoření vakua, čímž se zamezí nežádoucímu pohybu šablony a sítě a následuje osvit.
- Vyvolání motivu v deionizované vodě a následný oplach vyvolaného motivu.

6.2.2. Tisk tlustých vrstev

Tisk jednotlivých vrstev probíhal na sítotiskovém poloautomatu. Před použitím je nutné dané pasty vytáhnout z chladničky a nechat temperovat 24 hodin při pokojové teplotě. Kroky nutné k úspěšnému natištění jednotlivých vrstev jsou následující:

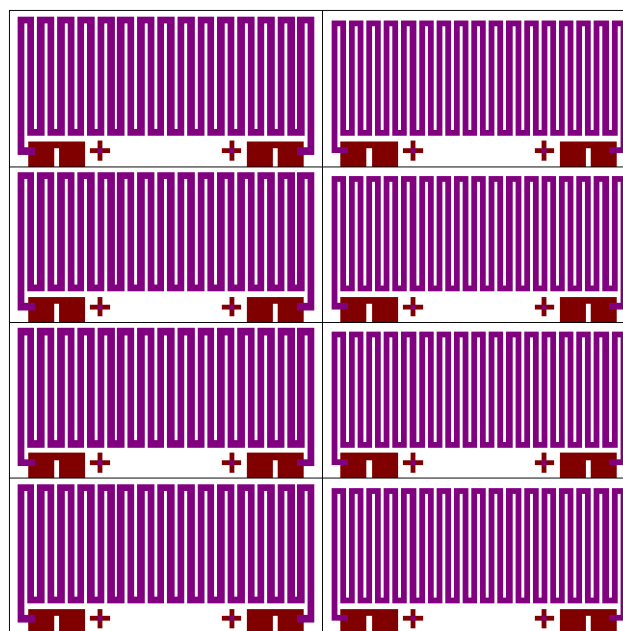
- Upevnění sítě do poloautomatu
- Uložení substrátu na posuvný stůl
- Upevnění těrky

- Sesouhlasení síta a substrátu
- Nastavení rychlosti a tlaku třerky
- Nanesení vrstvy rozmíchané vodivé pasty po celé šířce substrátu
- Provedení tisku
- Vložení potištěného substrátu do lodičky a následné sušení 15 min při 125°C

Teplota a doba sušení vychází z doporučených hodnot v technickém listu odpovídající pasty. Po zasuišení nanesené vodivé vrstvy se celý proces opakuje i pro tisk odporové vrstvy. Jakmile jsou i odporové vrstvy nanesené a vysušeny, následuje výpal, po kterém získají pasty požadované vlastnosti.

Pro vodivý motiv byla zvolena stříbrná pasta ESL 9912-A, pro odporové vrstvy pasta s parametrem 10 Ω/\square Tesla TT 5011 a pasta s parametrem 100 Ω/\square ESL 2912. Vybrané vzorky byly opatřeny dielektrickou vrstvou, pro kterou byla zvolena pasta ESL 4917.

Výsledná podoba jednoho z keramických substrátů je znázorněna na obr. 23



Obr. 23 Podoba jednoho ze substrátů

6.2.3. Kontrola nanesené vrstvy

Na hotových vzorcích bylo provedeno kontrolní měření nanesené vrstvy odporové pasty. V technologii nanášení TLV past přes síto je mnoho faktorů, které mohou negativně ovlivnit

výslednou hodnotu TLV odporu. Jedním z těchto faktorů je nerovnoměrné nanesení TLV pasty v různých místech substrátu. Orientační měření proběhlo na třech náhodných místech u tří náhodných substrátů, jak je znázorněno na obr. 24.

29,0 μm	
	29,0 μm
	27,0 μm

	27,5 μm
30,0 μm	
29,5 μm	

27,0 μm	
	31,0 μm
30,0 μm	

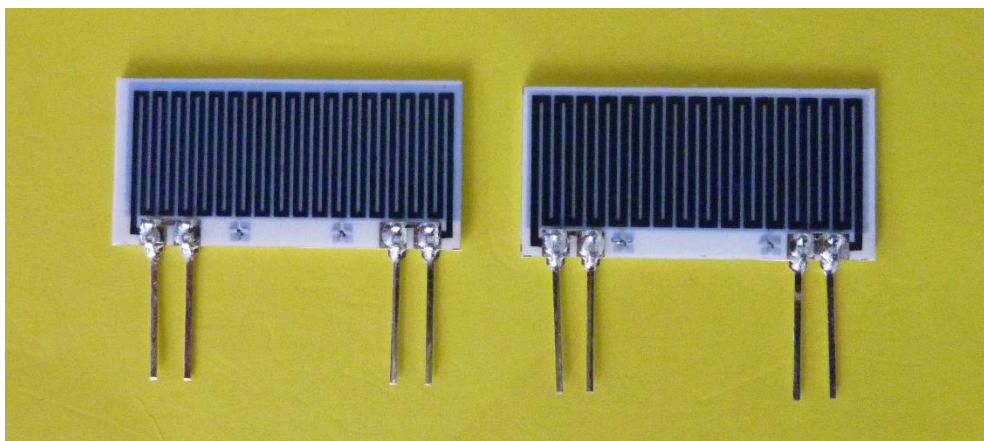
Obr. 24 Místa orientačního měření tloušťky TLV odporových vrstev

Orientační měření tloušťky nanesené TLV vrstvy na náhodných substrátech byla naměřena na optickém mikroskopu JENAVERT.

6.2.4. Řezání a kontaktování vzorků

Vypálené substráty byly na laserovém zařízení AURIEL ALS300L nařezány na jednotlivé vzorky. Ovládání laseru bylo poměrně intuitivní. Princip spočívá v nastavení počtu řezů, nastavení výchozího a konečného bodu každého řezu a počet opakovaných řezů. Důležité je také nastavení parametrů laserového paprsku. Nastavit lze výkon, frekvenci a rychlost posuvu laserového paprsku.

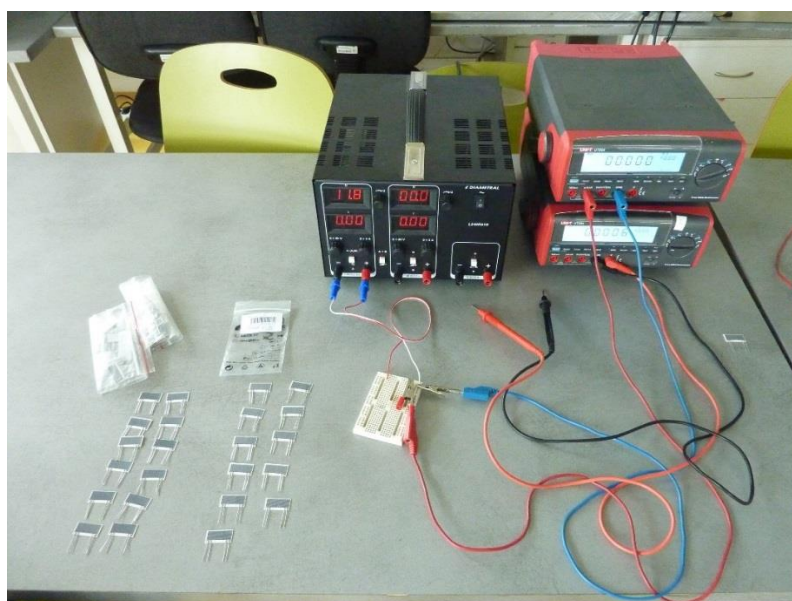
Nařezané vzorky byly osazeny drátovými hřebíkovými vývody. Proces pájení lze provést v pájecí lázni, kdy je vzorek ponořen pouze po okraj kontaktních plošek. V případě, že je vzorek ponořen celý, může dojít ke znehodnocení motivu. Vzhledem k nedostatku hřebíkových vývodů, bylo nutné některé vzorky opatřit obyčejnými drátovými vývody a vše pájet ručně. Podoba hotových vzorků je znázorněna na obr. 25.



Obr. 25 Hotové vzorky s horizontálním motivem a tloušťkou meandru 0,4 a 0,5 mm

6.2.5. Měření velikosti odporu

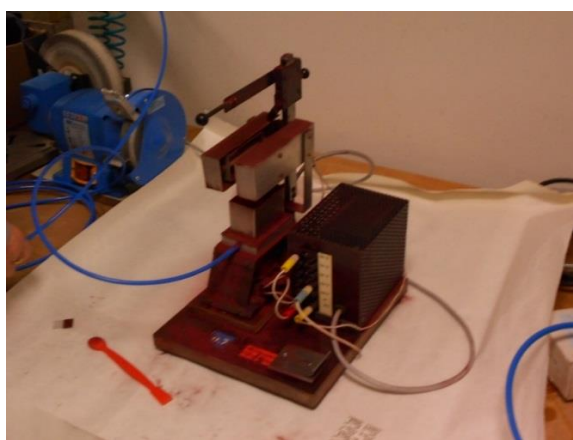
Před zapouzdřením vzorků bylo nutné změřit jejich hodnotu odporu. Naměřené hodnoty budou použity pro porovnání případných změn odporů vzorků po nanesení epoxidového materiálu. Metoda měření spočívala v nastavení konstantní hodnoty elektrického proudu. Cílem bylo získat hodnotu elektrického napětí při daném proudu a pomocí základního vzorce pro výpočet elektrického napětí získat odpovídající hodnotu elektrického odporu. Metoda měření úbytku napětí byla zvolena z důvodu menší chyby měření, než je tomu u přímé metody měření elektrického odporu. Přímá metoda zahrnuje navíc chybu měření převodníku pro výpočet elektrického odporu. Na obr. 26 je vyfoceno měřící stanoviště.



Obr. 26 Měřící stanoviště

6.2.6. Fluidizace

Poslední technologický krok spočíval v zapouzdření testovacích vzorků pomocí fluidizačního zařízení, které je znázorněno na obr. 27. U zařízení bylo nutné zkontrolovat, zda není protržený polopropustný filtr na dně fluidizační vaničky, zda je průchozí přívod vzduchu a zda je funkční zdroj vibrací. Po kontrole byla vanička naplněna epoxidovým práškem. Množství prášku bylo nutné volit tak, aby při vytvoření fluidu prášek neopouštěl prostor vaničky. Přívod vzduchu je regulovatelný a je nutné ho nastavit tak, aby byl epoxidový prášek nadnášen, ale zároveň se netvořili vzduchové bubliny, které prášek vynášejí mimo vaničku.

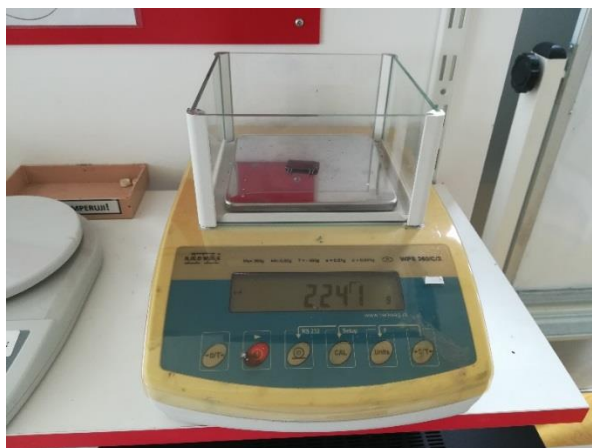


Obr. 27 Použité fluidizační zařízení

Po úspěšném nastavení parametrů fluidizačního zařízení byl do nosiče umístěn pouzdržený vzorek. Nejdříve bylo nutné vzorek přehřát. Pomocí nastavitelného ramena byl vzorek umístěn mezi topná tělesa, kde byl po dobu 75 sekund vystaven působení tepla. Následně byl na dobu 7 sekund vložen do vytvořeného fluidu a poté byl opět vystaven působení tepla. Nanosenou vrstvu epoxidu je vždy nutné ohřát, aby došlo k roztavení prášku a rovnoměrnému slití celého povrchu. Druhý ohřev trval 30 sekund a poté se celý proces opakoval. Vzorek byl ponořen celkem 3x. Navržený technologický postup byl nastavený pro všechny pouzdržené vzorky stejně.

Zapouzdržené vzorky bylo nutné vložit do pece, kde byly vytvrzeny. Parametry vytvrzovacího procesu byly nastaveny podle technického listu epoxidů jiných dodavatelů. Vytvrzení probíhalo 30 minut při teplotě 150 °C.

Po vytvrzení následovalo vysušení vzorků. Tento proces proběhl při teplotě 125 °C po dobu 24 hodin. Vysušení vzorků slouží k získu výchozí hodnoty hmotnosti vzorků, tzv. suchá hmotnost, která je výchozí hodnotou pro testování hmotnostního zisku testovaných vzorků. Hmotnostní zisk bude testován po uplynutí 168 a 504 hodin dlouhého nepřetržitého teplotního a vlhkostního namáhání testovaných vzorků. Pro tento test byla použita laboratorní váha Radwag WPS 360/C/2, která vyobrazena na obr. 28.



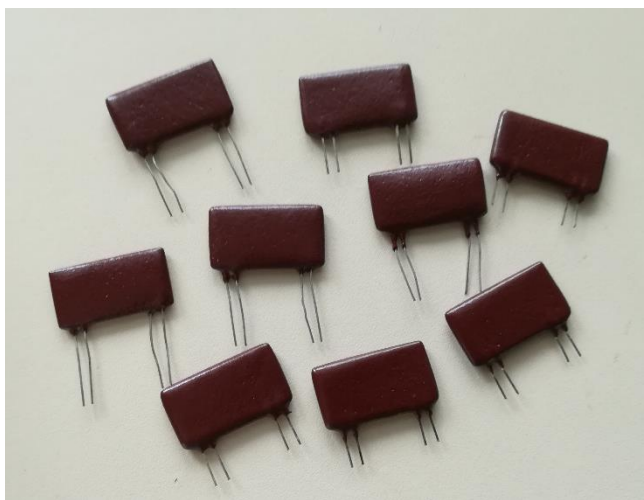
Obr. 28 Laboratorní váha Radwag WPS 360/C/2

Testování vzorků na vliv vlhkého tepla probíhal v klimatické komoře Shjianheng SDH01, která je na obr. 29. Parametry testu odpovídají normě ČSN EN 60068-2-67. Vzorky umístěné v komoře podléhali nepřetržitě vlivům teploty 85°C a relativní vlhkosti 85% po dobu 504 hodin. Nejdříve však bylo nutné komoru zprovoznit, protože byla zcela nová a nepoužitá. Po úspěšném zprovoznění bylo nutné komoru pravidelně kontrolovat. Zásobník s vodou nebyl zcela uzavřený a tak docházelo k odpařování vody ze systému. Při pravidelné kontrole jednou za 3 dny bylo nutné doplnit stav destilované vody, jinak by se komora sama odstavila.



Obr. 29 Klimatická komora Shjianheng SDH01

Na obr. 30 je výsledná podoba zapouzdřených vzorků.



Obr. 30 Hotové zapouzdřené vzorky

7. Vyhodnocení

7.1. Naměřené změny odporů po klimatickém namáhání

Cílem diplomové práce je sledovat změny elektrického odporu způsobené vlivem působení vlhkého tepla. Testováno bylo několik vzorků, které se liší v tloušťce a tvaru použitého meandru, velikosti odporové pasty a přítomnosti dielektrické vrstvy. Část vzorků od každého typu zůstala nezapouzdřena pro porovnání hodnot po zátěžovém testu. Vzorky byly vystaveny působení vlhkého tepla po dobu 168 a 504 hodin. V následujících výstupech jsou uvedeny naměřené hodnoty elektrického odporu po zapouzdření vzorků do fluidizovaného pouzdra, po vystavení vzorků namáhání vlhkým teplem po dobu 168 a 504 hodin nepřetržitě.

Vzhledem k vysokým hodnotám odporů meandrů a v porovnání s nimi malým výsledným změnám odporů, naměřených po zmíněném namáhání, jsou změřené údaje vyhodnoceny v procentech. Změny vyjádřené v procentech jsou graficky přehlednější, než nepatrné změny odporů.

Grafické výstupy jsou vyjádřeny formou krabicových grafů. Jedná se o nástroj, který dokáže v souboru hodnot identifikovat mezní hodnoty, které zkreslují výsledné statické charakteristiky, mezi které spadá například aritmetický průměr. Dále vyjadřují asymetrii, která vzniká například technologií výroby. Je-li rozdělení dat normální, je mediánová čára uprostřed „krabice“, v opačném případě se blíží k jednomu z kvartilů Q_{25} nebo Q_{75} . Postup pro vyjádření jednotlivých kvartilů je následující:

- Soubor naměřených hodnot je nutné seřadit vzestupně od nejnižší hodnoty po nejvyšší
- Medián je prostřední hodnota seřazeného souboru
- Pro určení 1. a 3. kvartilu existuje následující vzorec

$$Q_p = \frac{n \cdot p}{100} + 0,5$$

kde

n

počet hodnot

p

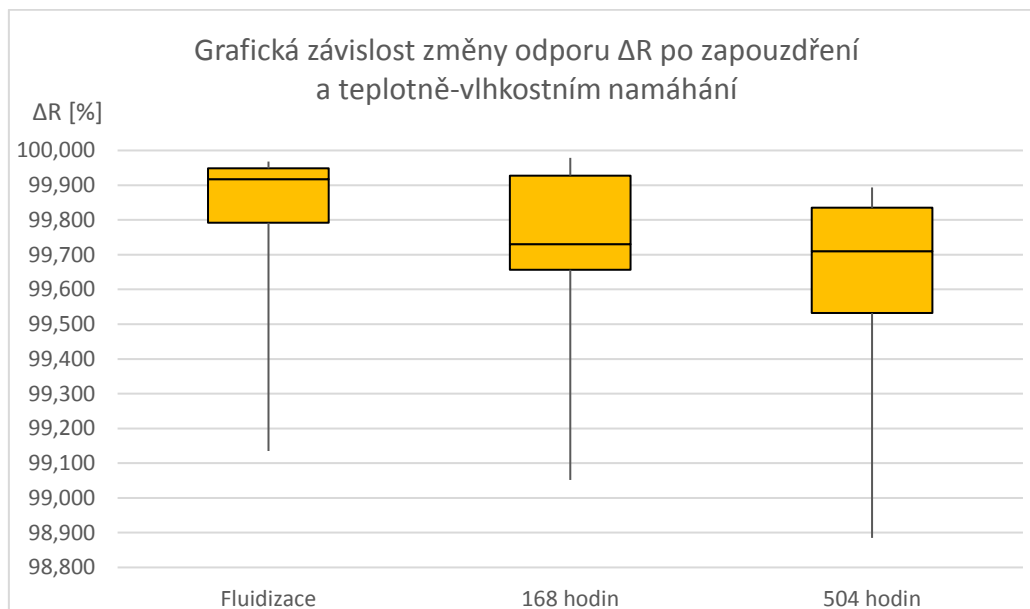
procento označující kvartil

7.1.1. Vertikální meandr 10 Ω/\square zapouzdřený

V tab. 10 jsou zaznamenány změny elektrického odporu vzorků po zapouzdření a následné klimatické zkoušce. Jedná se o zapouzdřené senzory tvořené vertikálním meandrem s použitou odporovou pastou 10 Ω/\square . Pro přehlednost jsou uvedené změny vyjádřeny v procentech. Na obr. 31 jsou naměřené změny vyjádřeny graficky formou krabicových grafů.

Tab. 10 Naměřené hodnoty odporů po zapouzdření a klimatickém namáhání.

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
37	0,5	100,000	99,968	99,979	99,894
38	0,5	100,000	99,917	99,731	99,710
40	0,5	100,000	99,948	99,928	99,835
45	0,5	100,000	99,792	99,657	99,532
46	0,5	100,000	99,135	99,052	98,885
Minimální hodnota		100,000	99,135	99,052	98,885
První kvartil Q_{25}		100,000	99,792	99,657	99,532
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,917	99,731	99,710
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,948	99,928	99,835
Maximální hodnota		100,000	99,968	99,979	99,894



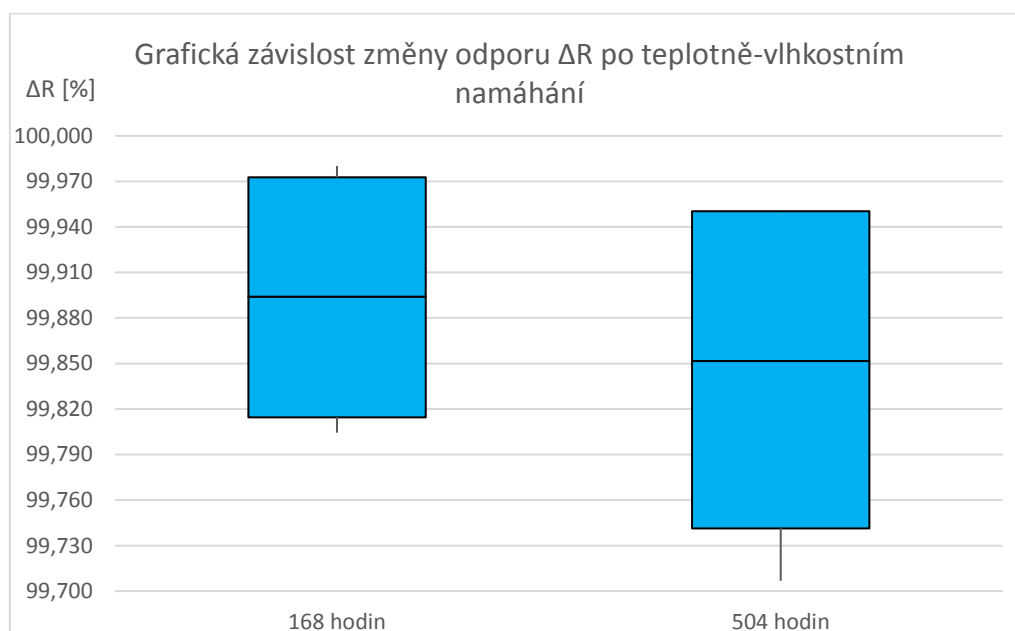
Obr. 31 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování zapouzdřených senzorů (10 Ω/\square)

7.1.2. Vertikální meandr 10 Ω/\square nezapouzdřený

V tab. 11 jsou zaznamenány změny hodnot elektrického odporu nezapouzdřených vzorků po klimatickém testování. Jedná se o senzory tvořené vertikálním meandrem s použitou odporovou pastou 10 Ω/\square . Na obr. 32 jsou naměřené změny velikosti odporu vyjádřeny v grafické podobě formou krabicových grafů.

Tab. 11 Naměřené hodnoty odporů nezapouzdřených vzorků po klimatickém namáhání.

Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
41	0,5	100,000	99,970	99,950
42	0,5	100,000	99,818	99,707
44	0,5	100,000	99,804	99,753
48	0,5	100,000	99,980	99,950
Minimální hodnota		100,000	99,804	99,707
První kvartil Q_{25}		100,000	99,815	99,741
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,894	99,852
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,973	99,950
Maximální hodnota		100,000	99,980	99,950



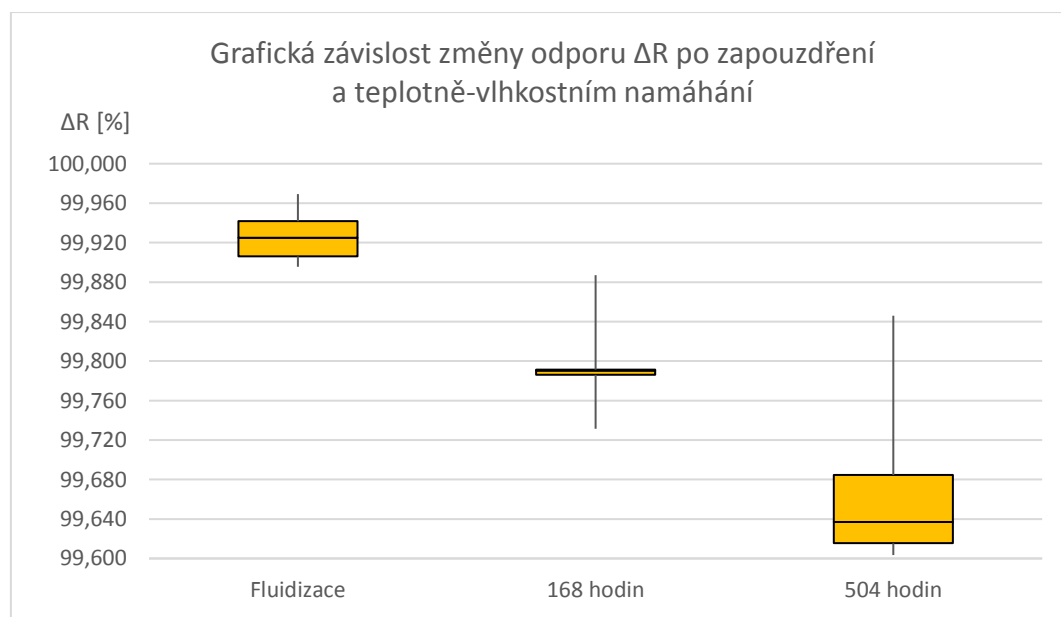
Obr. 32 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování nezapouzdřených senzorů (10 Ω/\square).

7.1.3. Vertikální meandr 10 Ω/\square s dielektrickou vrstvou zapouzdřený

V tab. 12 jsou zaznamenány změny hodnot elektrického odporu vzorků po zapouzdření a klimatickém namáhání. Jedná se o zapouzdřené senzory tvořené vertikálním meandrem s použitou odporovou pastou 10 Ω/\square . Tyto senzory mají navíc odporovou vrstvu potaženou vrstvou dielektrika. Změny jsou vyjádřeny v procentech. Na obr. 33 jsou naměřené změny velikosti odporu vyjádřeny v grafické podobě formou krabicových grafů.

Tab. 12 Naměřené hodnoty odporů po zapouzdření a klimatickém namáhání.

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
60	0,5	100,000	99,969	99,887	99,846
61	0,5	100,000	99,906	99,786	99,603
62	0,5	100,000	99,925	99,790	99,615
63	0,5	100,000	99,942	99,791	99,685
64	0,5	100,000	99,896	99,731	99,637
Minimální hodnota		100,000	99,896	99,731	99,603
První kvartil Q_{25}		100,000	99,906	99,786	99,615
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,925	99,790	99,637
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,942	99,791	99,685
Maximální hodnota		100,000	99,969	99,887	99,846



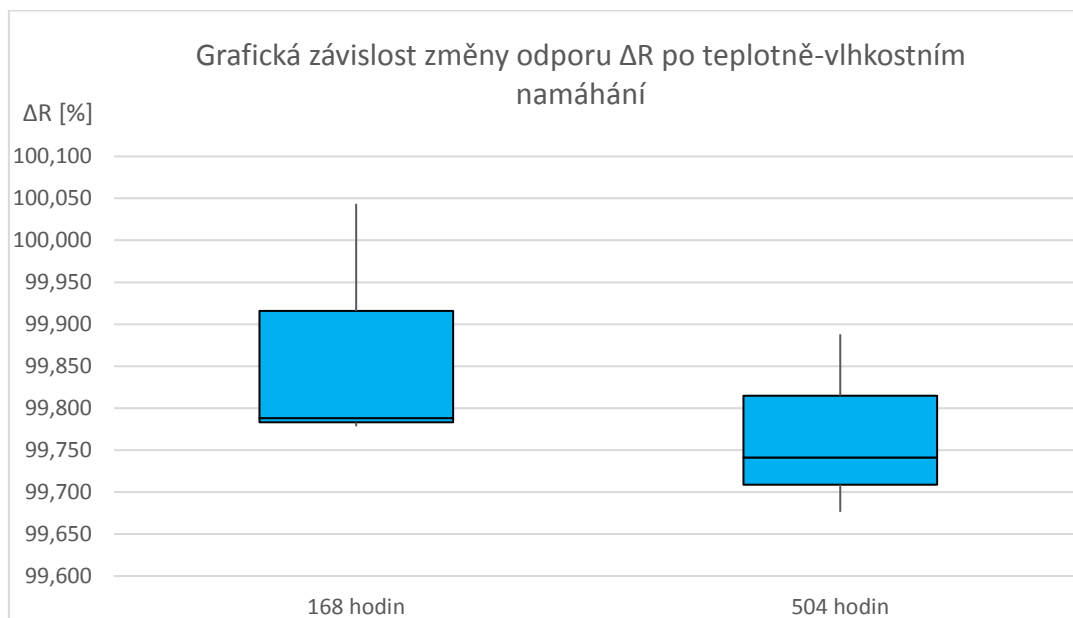
Obr. 33 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování zapouzdřených senzorů potažených vrstvou dielektrika (10 Ω/\square)

7.1.4. Horizontální meandr $10 \Omega/\square$ s dielektrickou vrstvou nezapouzdřený

V tab. 13 jsou zaznamenány změny hodnot elektrického odporu nezapouzdřených vzorků po klimatickém testování. Jedná se o senzory tvořené horizontálním meandrem s použitou odporovou pastou $10 \Omega/\square$. Motiv meandru je navíc pokrytý vrstvou dielektrika. Na obr. 34 jsou naměřené změny velikosti odporu vyjádřeny v grafické podobě formou krabicových grafů.

Tab. 13 Naměřené hodnoty odporů nezapouzdřených vzorků po klimatickém namáhání.

Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
78	0,5	100,000	99,788	99,676
79	0,5	100,000	99,778	99,741
80	0,5	100,000	100,044	99,888
Minimální hodnota		100,000	99,778	99,676
První kvartil Q_{25}		100,000	99,783	99,709
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,788	99,741
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,916	99,815
Maximální hodnota		100,000	100,044	99,888



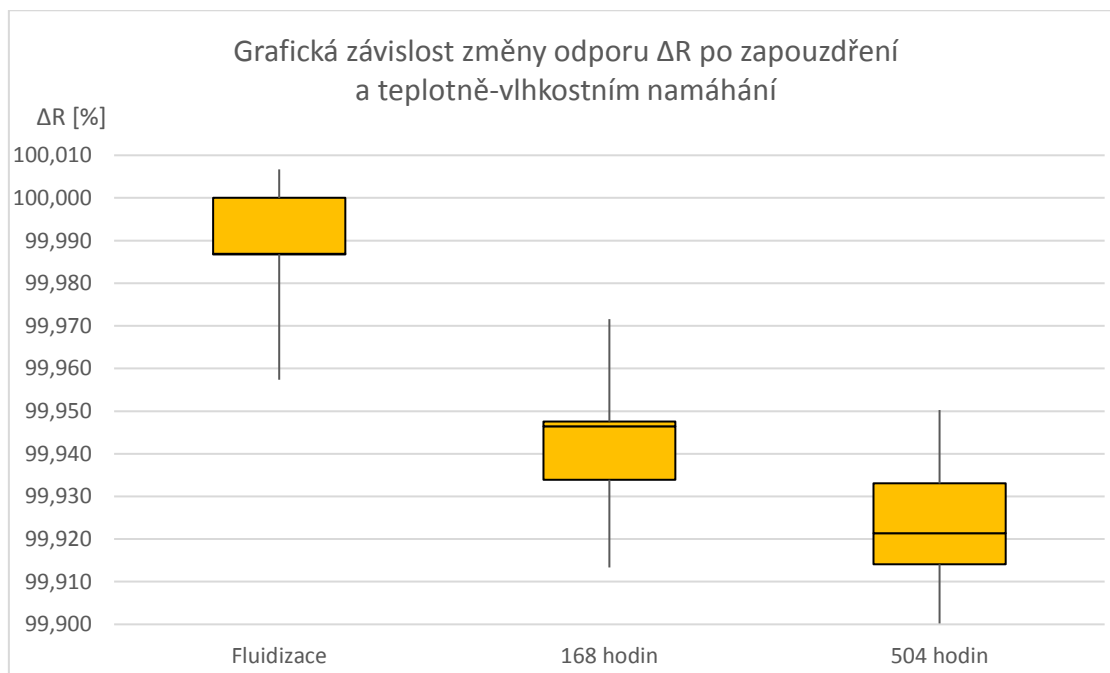
Obr. 34 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování nezapouzdřených senzorů potažených vrstvou dielektrika ($10 \Omega/\square$)

7.1.5. Vertikální meandr 100 Ω/\square zapouzdřený

V tab. 14 jsou zaznamenány změny elektrického odporu vzorků po zapouzdření a následné klimatické zkoušce. Jedná se o zapouzdřené senzory tvořené vertikálním meandrem s použitou odporovou pastou 100 Ω/\square . Na obr. 35 jsou naměřené změny vyjádřeny graficky formou krabicových grafů.

Tab. 14 Naměřené hodnoty odporů vzorků po zapouzdření a klimatickém namáhání.

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
97	0,4	100,000	99,987	99,934	99,914
99	0,4	100,000	99,987	99,948	99,921
100	0,4	100,000	100,007	99,946	99,933
101	0,4	100,000	99,957	99,972	99,950
102	0,4	100,000	100,000	99,913	99,899
Minimální hodnota		100,000	99,957	99,913	99,899
První kvartil Q_{25}		100,000	99,987	99,934	99,914
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,987	99,946	99,921
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	100,000	99,948	99,933
Maximální hodnota		100,000	100,007	99,972	99,950



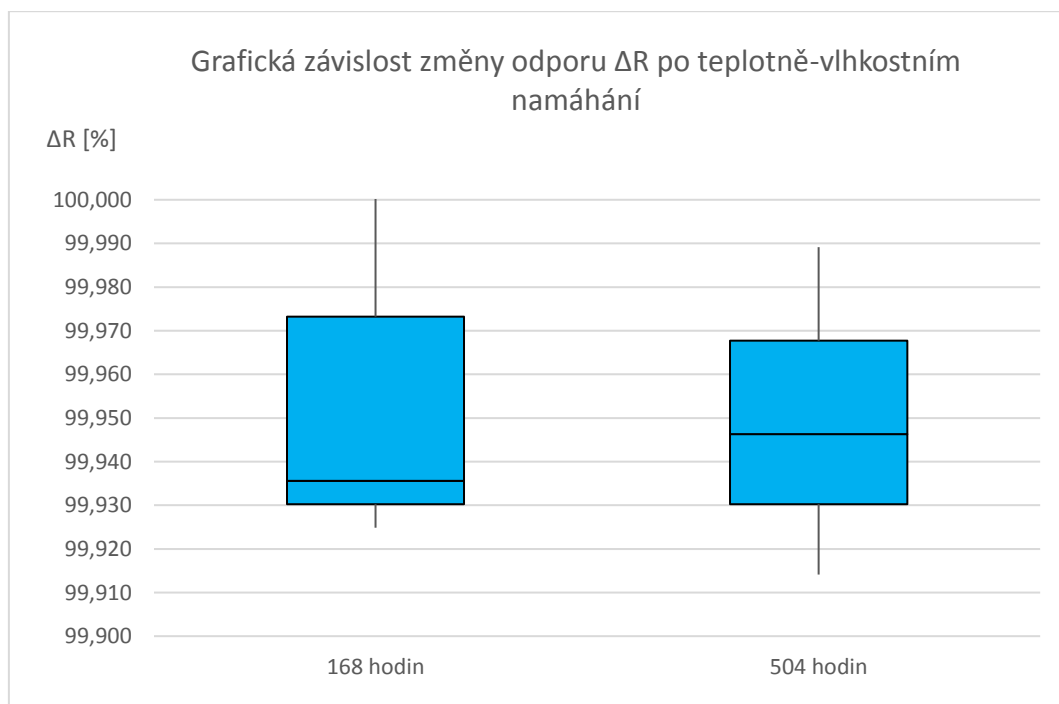
Obr. 35 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování zapouzdřených senzorů (100 Ω/\square).

7.1.6. Horizontální meandr 100 Ω/\square nezapouzdřený

V tab. 15 jsou zaznamenány změny elektrického odporu nezapouzdřených vzorků po klimatickém testování. Jedná se o senzory tvořené horizontálním meandrem s použitou odporovou pastou 100 Ω/\square . Na obr. 36 jsou tyto hodnoty vyjádřeny graficky formou krabicových grafů.

Tab. 15 Naměřené hodnoty odporů nezapouzdřených vzorků po klimatickém namáhání.

Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
78	0,5	100,000	99,925	99,914
79	0,5	100,000	100,011	99,989
80	0,5	100,000	99,936	99,946
Minimální hodnota		100,000	99,925	99,914
První kvartil Q_{25}		100,000	99,930	99,930
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,936	99,946
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,973	99,968
Maximální hodnota		100,000	100,011	99,989



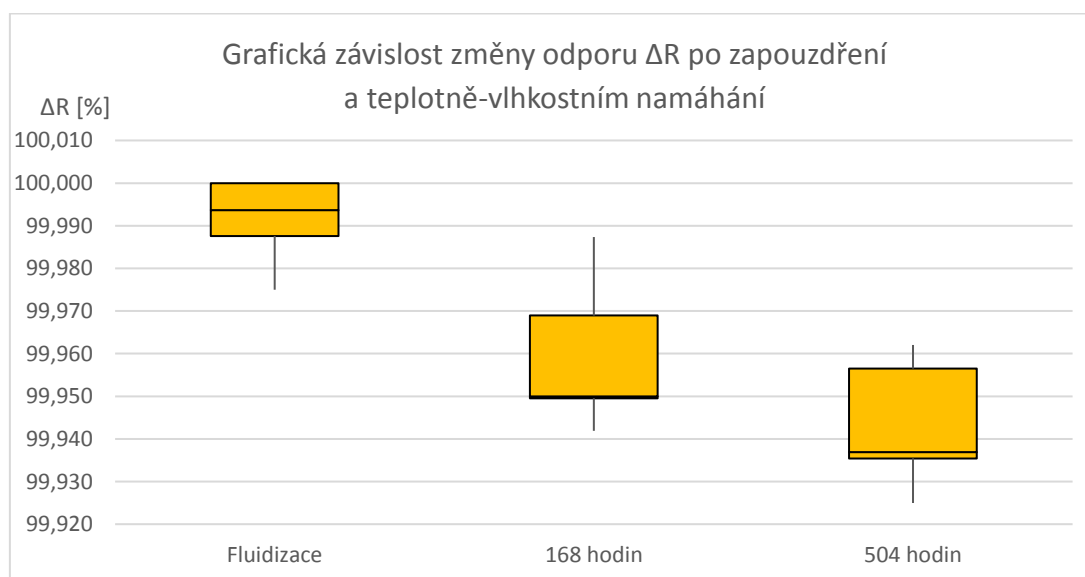
Obr. 36 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování zapouzdřených senzorů (100 Ω/\square).

7.1.7. Horizontální meandr 100 Ω/\square s dielektrickou vrstvou zapouzdřený

V tab. 16 jsou zaznamenány změny hodnot elektrického odporu vzorků po zapouzdření a klimatickém namáhání. Jedná se o zapouzdřené senzory tvořené horizontálním meandrem s použitou odporovou pastou 100 Ω/\square . Tyto senzory mají navíc odporovou vrstvu potaženou vrstvou dielektrika. Na obr. 37 jsou naměřené změny velikosti odporu vyjádřeny v grafické podobě formou krabicových grafů.

Tab. 16 Naměřené hodnoty odporů po zapouzdření a klimatickém namáhání.

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
121	0,5	100,000	99,994	99,950	99,937
124	0,5	100,000	100,000	99,942	99,935
126	0,5	100,000	99,988	99,969	99,957
127	0,5	100,000	99,975	99,950	99,925
128	0,5	100,000	100,000	99,987	99,962
Minimální hodnota		100,000	99,975	99,942	99,925
První kvartil Q_{25}		100,000	99,988	99,950	99,935
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,994	99,950	99,937
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	100,000	99,969	99,957
Maximální hodnota		100,000	100,000	99,987	99,962



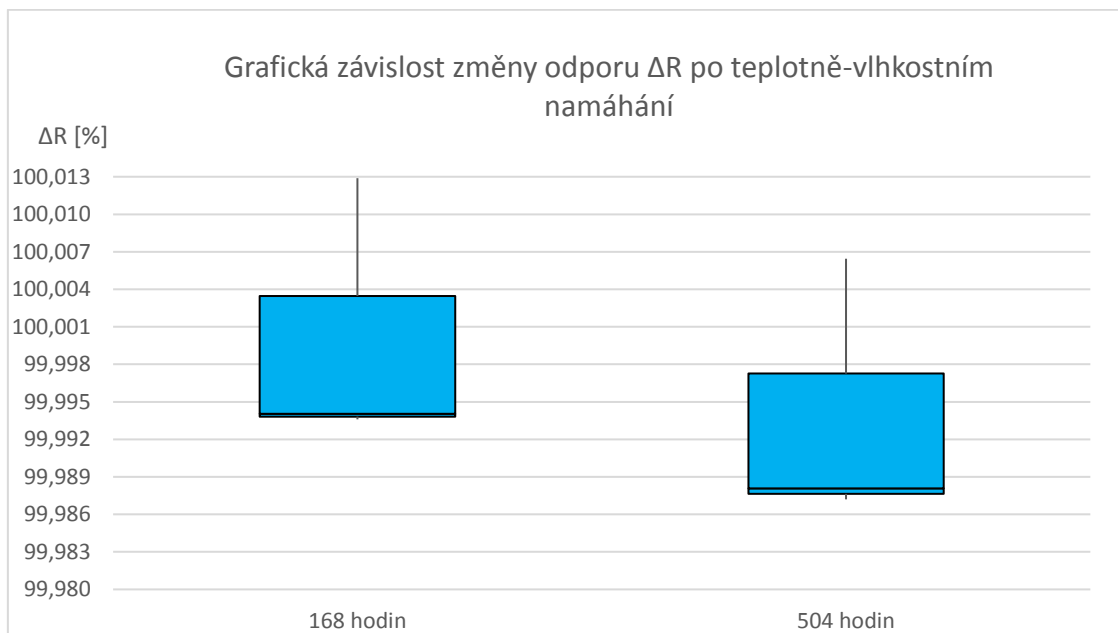
Obr. 37 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování zapouzdřených senzorů potažených vrstvou dielektrika (100 Ω/\square)

7.1.8. Horizontální meandr 100 Ω/\square s dielektrickou vrstvou nezapouzdřený

V tab. 17 jsou zaznamenány změny hodnot elektrického odporu nezapouzdřených vzorků po klimatickém testování. Jedná se o senzory tvořené horizontálním meandrem s použitou odporovou pastou 100 Ω/\square . Motiv meandru je navíc pokrytý vrstvou dielektrika. Na obr. 38 jsou naměřené změny velikosti odporu vyjádřeny v grafické podobě formou krabicových grafů.

Tab. 17 Naměřené hodnoty odporů nezapouzdřených vzorků po klimatickém namáhání.

Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
122	0,5	100,000	100,013	100,006
123	0,5	100,000	99,994	99,987
125	0,5	100,000	99,994	99,988
Minimální hodnota		100,000	99,994	99,987
První kvartil Q_{25}		100,000	99,994	99,988
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,994	99,988
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	100,003	99,997
Maximální hodnota		100,000	100,013	100,006



Obr. 38 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování nezapouzdřených senzorů potažených vrstvou dielektrika (100 Ω/\square)

7.2. Výpočet nejistoty použitých měřících přístrojů

Cílem tohoto měření bylo získat přehled o reálných hodnotách odporů jednotlivých vzorků a porovnat je s teoretickými údaji. Při měření byl použit laboratorní zdroj DIAMETRAL L240R51D a dva stolní digitální multimetry UNI-T UT804. Jeden multimetr byl použit pro měření procházejícího elektrického proudu a druhý pro měření elektrického napětí mezi vývody vzorků.

Hodnoty nepřesnosti použitých přístrojů byly získány z technických listů příslušícím danému přístroji.

Zdroj DIAMETRAL L240R51D – při 12 V stabilita 0,05%

Přesnost přístroje

$$\Delta_{P1} = 0,05 \cdot 12 = 0,6 \text{ V}$$

Nejistota typu B

$$u_{b1} = \frac{\Delta_{P1}}{k} = \frac{0,6}{\sqrt{3}} = 3,464 \cdot 10^{-1} \text{ V}$$

Multimetr UNI-T UT804 – rozsah 40 mA, měřená hodnota 1 mA, rozlišení 1 μA , přesnost měření $\pm 0,1\%$ +15 digitů

Přesnost přístroje

$$\Delta_{P2} = \pm(0,1 \cdot 1 + 15 \cdot 0,001) = 0,115 \text{ mA}$$

Nejistota typu B

$$u_{b2} = \frac{\Delta_{P2}}{k} = \frac{0,115}{\sqrt{3}} = 6,640 \cdot 10^{-2} \text{ mA}$$

Multimetr UNI-T UT804 – rozsah 400 μA , měřená hodnota 50 μA , rozlišení 10 nA, přesnost měření $\pm 0,1\% + 15$ digitů

Přesnost přístroje

$$\Delta_{P3} = \pm(0,1 \cdot 50 + 15 \cdot 0,01) = 5,15 \mu\text{A}$$

Nejistota typu B

$$u_{b3} = \frac{\Delta_{P3}}{k} = \frac{5,15}{\sqrt{3}} = 2,973 \mu\text{A}$$

Multimetr UNI-T UT804 – rozsah 40 V, měřená hodnota 12 V, 1 mV, přesnost měření $\pm 0,1\% + 5$ digitů

Přesnost přístroje

$$\Delta_{P4} = \pm(0,1 \cdot 12 + 5 \cdot 0,001) = 1,205 \text{ V}$$

Nejistota typu B

$$u_{b4} = \frac{\Delta_{P3}}{k} = \frac{1,205}{\sqrt{3}} = 0,696 \mu\text{A}$$

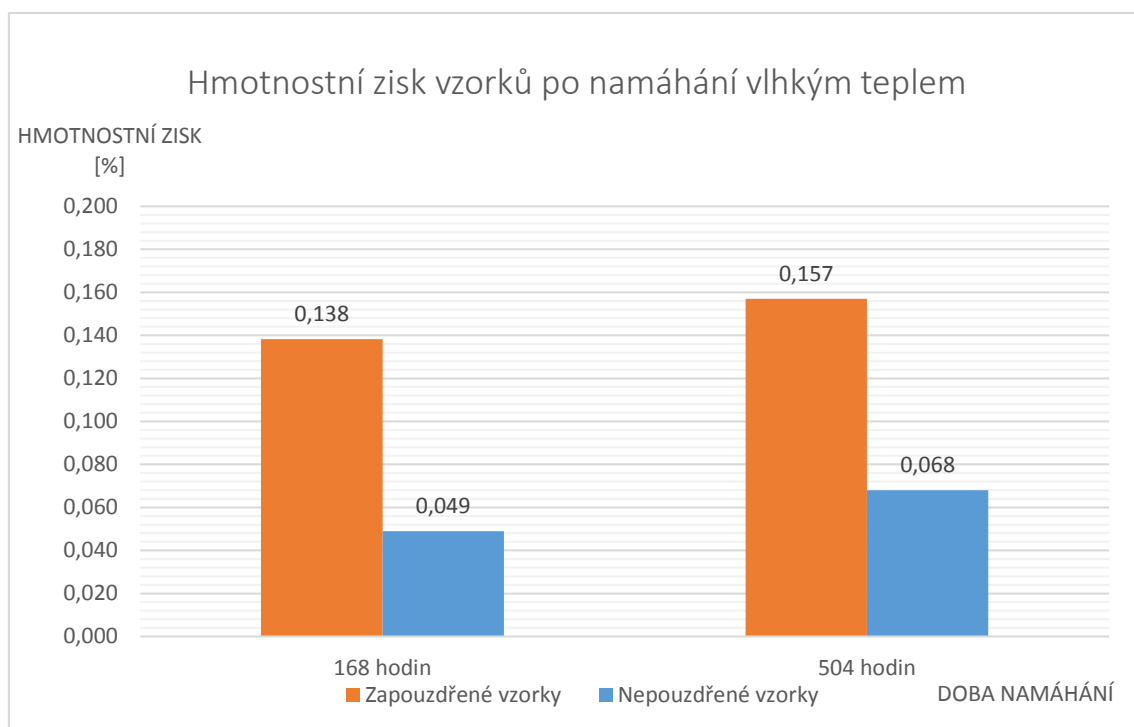
7.3. Hmotnostní zisk po klimatické zkoušce

Test označovaný jako metoda hmotnostního zisku je ukazatel toho, zda zapouzdřené vzorky pohlcují a zadržují vlhkost. Pro porovnání výsledků jsou předmětem testování i nezapouzdřené vzorky. Z testu by mělo být patrné, zda vlhkost pohlcuje pouzdro nebo keramický substrát s TLV pastou. Pro testování byla použita laboratorní váha Radwag WPS 360/C/2 – rozsah 360g ±2mg. Naměřené údaje jsou zpracovány v tab. 18. Grafická podoba výsledného hmotnostního zisku je znázorněna v obr. 39.

Tab. 18 Průměrné hodnoty hmotnostního zisku zapouzdřených i nezapouzdřených vzorků

Zapouzdřené vzorky							
Počet vzorků	Hmotnost [g]	168 h [g]	Zisk		504 h [g]	Zisk	
			[mg]	[%]		[mg]	[%]
84	2,309	2,312	3,179	0,138	2,312	3,607	0,157

Nezapouzdřené vzorky							
Počet vzorků	Hmotnost [g]	168 h [g]	Zisk		504 h [g]	Zisk	
			[mg]	[%]		[mg]	[%]
53	0,887	0,887	0,434	0,049	0,887	0,604	0,068



Obr. 39 Metoda hmotnostního zisku

7.4. Měření tloušťky nanesené vrstvy

Vzhledem k tomu, že použité fluidizační zařízení není automatizované a vyžaduje obsluhu, je nutné při pouzdření většího počtu součástí dodržet stejný technologický postup a to především časové intervaly. V této práci bylo zapouzdřeno 80 vzorků. Pro určení tloušťky nanesené vrstvy epoxidu bylo vybráno 15 náhodných vzorků a pomocí posuvného měřítka byly naměřeny jednotlivé hodnoty tloušťky.

U vybraných vzorků byla změřena jejich tloušťka v nezapouzdřeném stavu a po zapouzdření viz. tab. 19. Tloušťka nanesené vrstvy epoxidu byla určena z následujícího vztahu:

$$d_{epoxidu} = \frac{d_{zapouzdřená} - d_{nezapouzdřená}}{2} [mm]$$

Příklad výpočtu

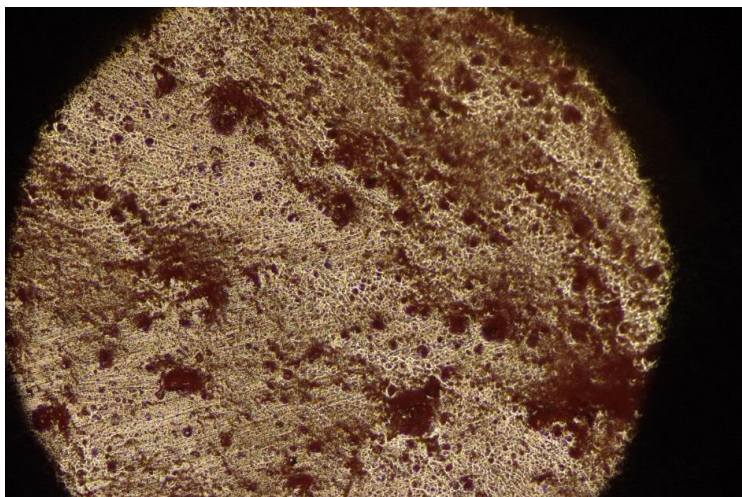
$$s_{epoxidu} = \frac{3,44 - 0,63}{2} = 1,405 [mm]$$

Tab. 19 Naměřené hodnoty tloušťky epoxidu vybraných vzorků

Tloušťka před zapouzdřením [mm]	Tloušťka po zapouzdření [mm]	Stěna pouzdra [mm]
0,63	3,44	1,405
0,63	3,64	1,505
0,63	3,59	1,480
0,62	3,46	1,420
0,63	3,48	1,425
0,64	3,53	1,445
0,62	3,42	1,400
0,62	3,91	1,645
0,63	4,02	1,695
0,64	3,52	1,440
0,63	3,58	1,475
0,62	3,51	1,445
0,64	3,68	1,520
0,63	3,47	1,420
0,63	3,82	1,595
0,62	3,59	1,485
Průměrná hodnota		1,488

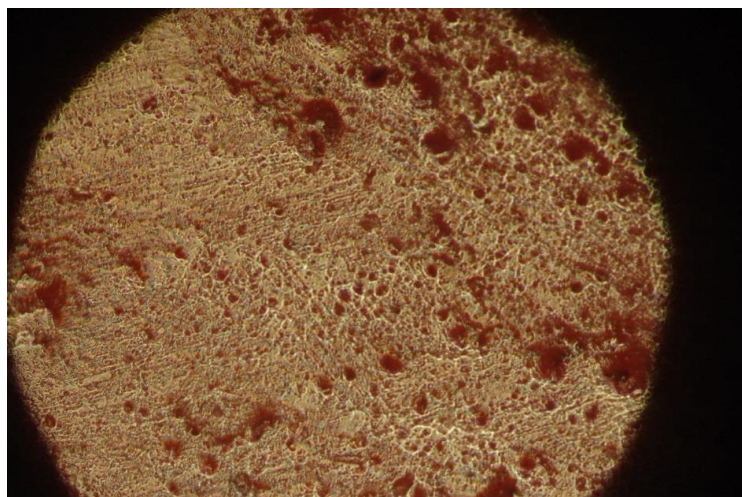
7.5. Sledování struktury povrchu fluidizovaného pouzdra

Následující fotografie zobrazují strukturu povrchu fluidizovaného pouzdra. Na obr. 40 je vyobrazen detail povrchu, který je 25-tinásobně zvětšený. Na povrchu nejsou patrné žádné praskliny, stopy pnutí či dutiny, které mohou narušit integritu pouzdra.



Obr. 40 Povrch fluidizovaného pouzdra zvětšený 25x

Na obr. 41 je sledovaný povrch zvětšen 50x. Ani zde nejsou patrné žádné defekty.



Obr. 41 Povrch fluidizovaného pouzdra zvětšený 50x

Oba snímky byly pořízeny na laboratorním optickém mikroskopu JENAVERT.

7.6. Shrnutí dosažených výsledků

Ze získaných údajů je patrné, že změna velikosti odporu u zapouzdřených vzorků je větší, než změna u nezapouzdřených vzorků. Naměřené hodnoty odporu mají tendenci klesat. U zapouzdřených vzorků dosahují naměřené změny 0,05 – 0,36 % od výchozí hodnoty, zatímco u odkrytých vzorků je změna hodnoty 0,011 – 0,15 %. V jednom případě byla ovšem naměřena změna 0,25 %, která se blíží změnám zapouzdřených vzorků, ovšem jedná se o výraznou odchylku od ostatních hodnot a s největší pravděpodobností bude dána chybou měření.

Z výsledků hmotnostního zisku lze vyčíst, že zapouzdřené vzorky vykazují větší nárůst hmotnosti než vzorky bez pouzdra. Hmotnostní nárůst zapouzdřených vzorků po 168 hodinách teplotního a vlhkostního namáhání odpovídá hodnotě 3,179 mg a po uplynutí 504 hodin namáhání hodnotě 3,607 mg. Průměrná hodnota celého vzorku i s pouzdrům je 2,309 g, z toho plyne, že nárůst odpovídá hodnotám 0,138 % a 0,157 %. U vzorků bez pouzdra je nárůst o 0,604 mg, což odpovídá zisku 0,068 %.

Za předpokladu, že vlhkost pohltilo pouze epoxidové pouzdro, jsou hodnoty zisku podstatně vyšší. Z rozdílu průměrné hmotnosti zapouzdřených vzorků a vzorků bez pouzdra lze získat průměrnou hodnotu samotných pouzder. V tom případě by zisk činil 0,223 % po uplynutí 168 hodin a 0,253 % po uplynutí 504 hodin namáhání.

Na závěr byla pouzdra zkontrolována opticky. Z povrchu je patrné, že vypalovací proces byl nastaven správně a povrch epoxidu se rovnoměrně slil. Povrch je také bez viditelných známek poškození, prasklin a dutin.

Odolnost vůči působení vlhkosti by se mohla zvýšit nanesením tenké vrstvy např. polymerního laku na pouzdřený vzorek nebo na hotové fluidizovaná pouzdro. Tím by ochrana proti působení vnějších vlivů znásobila.

8. Závěr

Cílem diplomové práce bylo vypracovat řešerši zabývající se problematikou nehermetických pouzder a pouzdřících materiálů zaměřenou především na technologii fluidizace. Praktická část práce spočívala v testování odolnosti fluidizovaných pouzder proti působení vlivu zvýšené vlhkosti a teploty.

Pro testování bylo navrženo a vyrobeno několik senzorů, které jsou tvořeny odporovými meandry o různém tvaru, tloušťce a použité odporové pastě. Byly zhotoveny aditivní technologií sítotisku na anorganickém základním materiálu Al_2O_3 . Část z vyrobených senzorů byla zapouzdřena do epoxidového pouzdra technologií označovanou termínem fluidizace. Naměřená tloušťka naneseného epoxidu odpovídá hodnotě 1,488 mm.

Testovací vzorky byly vystaveny působení vlhkého tepla po dobu 504 hodin, jak je stanoveno normou ČSN EN 60068-2-67. Ze získaných údajů je patrné, že působení vlhkého tepla mělo vliv na testované vzorky, který se projevil poklesem velikosti elektrického odporu. Změny u zapouzdřených vzorků jsou výrazně vyšší než u vzorků nezapouzdřených. Nejvyšší zaznamenaná změna elektrického odporu se týká senzorů pokrytých dielektrickou vrstvou tvořených vertikálním meandrem o tloušťce 0,4 mm a použité pastě $10 \Omega/\square$. Velikost změny odpovídá hodnotě -0,663 % vztaheně k původní hodnotě elektrického odporu vzorků. Tuto skutečnost potvrzuje i výsledek hmotnostního zisku. Zisk zapouzdřených vzorků činí 0,157 %, zatímco zisk nezapouzdřených vzorků pouze 0,068 %.

Změny elektrického odporu v zapouzdřených vzorcích jsou zřejmě způsobeny přítomností vlhkosti v objemu pouzdra, zatímco u nezapouzdřených vzorků zapříčinila změny zbytková vlhkost. To potvrzuje také vysokou klimatickou odolnost tlustých vrstev.

Optická kontrola prokázala, že povrch fluidizovaných pouzder je homogenní a nenese žádné viditelné známky tvorby prasklin či dutin, které by negativně ovlivňovaly mechanické vlastnosti pouzder.

Všechny tyto skutečnosti společně s dalšími výhodami této metody, mezi které spadá jednoduchost, rychlost a nízká cena, předurčují fluidizovaná pouzdra jako vhodnou variantu pro tvorbu levných a spolehlivých nehermetických pouzder.

Seznam použité literatury

- [1] SZENDIUCH, Ivan. *Pouzdrění v mikroelektronice*. Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Technická 3058/10: NOVAPRESS s.r.o., nám Republiky 725/15, 614 00 Brno, 2016. ISBN 978-80-214-5417-0.
- [2] SZENDIUCH, Ivan. Trendy v pouzdrění a propojování. In: *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/04a_pouzdreni_a_substraty.pdf
- [3] SZENDIUCH, Ivan. Pouzdrění v elektrotechnice. In: *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Modern%C3%AD%20pouzdra%20a%20substr%C3%A1ty\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Modern%C3%AD%20pouzdra%20a%20substr%C3%A1ty(Bc).pdf)
- [4] Křemík. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/K%C5%99em%C3%ADk>
- [5] STARÝ, Jiří a Petr KAHLE. *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. Brno, 208 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=21618
- [6] NOVOTNÝ, Václav. *Termomechanická spolehlivost pájených propojení v elektrotechnice* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85303. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.
- [7] BUJALOBOKOVÁ, Magdaléna a Pavel TRNKA. Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích. *ELEKTRO* [online]. **2008**, 3 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36505.pdf>
- [8] Virtuální laboratoř - Ultrazvukové kontaktování. In: *VUT* [online]. Brno [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/virtualni-laborator/ultrazvukove-kontaktovani/technologie/>
- [9] Pouzdrění a elektrické propojování. In: *VUT* [online]. Brno [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pouzdreni-a-propojovani/>

- [10] MAREŠ, P. *Kontaktování polovodičových čipů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8802.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Marek Novotný.
- [11] ZLÁMAL, Jiří. *Aplikace moderních pouzdrů v elektrotechnice* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8802.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Szendiuch, Ph.D.
- [12] GANČEV, Jan. *Perspektivní materiály pro pouzření* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8802.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Szendiuch, Ph.D.
- [13] Zátavy kovu a skla. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2016-12-05]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1tavy_kovu_a_skla
- [14] GILLES, Ken. *Thermoplastics for packaging* [online]. , 8 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z:
http://www.et-trends.com/files/Thermoplastics_for_Packaging.pdf
- [15] *Vstřikování plastů* [online]. [cit. 2016-12-05]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [16] SKÁCEL, Josef. *Studie srovnání vlastností pouzder QFN a BGA* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102575.
Diplomová práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Szendiuch, Ph.D.
- [17] HLADÍK, Petr. *Využití polymerů a jejich slitin v elektrotechnice* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z:
https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/3941/Diplomova_prace_Hladik_Petr.pdf?sequence=1.
Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, Csc.

- [18] ŠTEGBAUER, Radek. *Silikony v elektrotechnice* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10049/DP%20Silikony%20v%20elektrotechnice%20-%20Radek%20Stegbauer.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, Csc.
- [19] DÓCZY, Robert. *Izolační vlastností struktur typu Flip Chip* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57790. Bakalářská práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Jiří Pulec.
- [20] Rezistorová pole. In: *RS-online* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://cz.rs-online.com/web/p/rezistorova-pole/6928585/>
- [21] Deserializér LVDS. In: *RS-online* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://cz.rs-online.com/web/p/products/7614827/>
- [22] SOT-323. In: *Embedded.ninja* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://blog.mbedded.ninja/pcb-design/component-packages/sot-323-component-package>
- [23] Pin Grid Array (PGA). In: *TEXAS INSTRUMENTS* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/packaging/docs/searchtipackages.tsp?packageName=PGA>
- [24] BGA Component Package. In: *Embedded.ninja* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://blog.mbedded.ninja/pcb-design/component-packages/bga-component-package>
- [25] Vyroba desek plosnych spoju. In: *Doc player* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/15184568-Vyroba-desek-plosnych-spoju.html>
- [26] Microwave Packaging Technology. In: *Vertical response* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://hosted.verticalresponse.com/635266/b945916194/TEST/TEST/>
- [27] The package interconnect selection quandary. In: *EE times* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: [1] http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1225866
- [28] Tape-automated bonding carrier. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Tape-automated_bonding_carrier.svg
- [29] Schottky mixer and detector diodes. In: *MACOM* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.macom.com/products/diodes/schottky-mixer-and-detector-diod>

- [30] Century Seals. In: *Century Seals* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z:
<http://www.centuryseals.com/>
- [31] Epoxidová pryskyřice. In: *Uart.cz* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z:
<http://uart.cz/1214/epoxidova-pryskyrice-a-elektronika/>
- [32] Aplikace silikonu v elektrotechnice. In: *Volty* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z:
<https://www.volty.cz/2016/02/25/aplikace-silikonu-v-elektrotechnice/>
- [33] PINC, Jakub. *Elektronické součástky citlivé na vlhkost, měření jejich citlivosti a zásady manipulace s nimi ve výrobním podniku*. [online]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 2012 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z:
<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2723/Diplomova%20prace%20Pinc%20Jakub.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Vedoucí práce Milan Šíma.
- [34] USAMA, Ahmed. *Packaging types* [online]. 2016, 24 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z:
<https://www.slideshare.net/ahmedusama10/packaging-types>
- [35] VORÁČ, Petr. *Návrh a optimalizace fluidního roštu z hlediska funkčnosti a ekonomiky výroby* [online]. Brno, 2010 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29397. Diplomová práce. Vysoké učení technické.
- [36] Pryskyřice a zalevací hmoty. In: *G3* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z:
http://www.g3.cz/img/Katalog/Elektro/3M_Pryskyrice_a_zalev.hmoty.pdf
- [37] Passive electronic component types and the need for electrical insulation. In: *SOLEPOXY* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z:
<http://www.solepox.com/Tools/Broadcaster/frontend/itemcontent.asp?IID=8&type=7&size=1&phase=1&lngDisplay=2&jPageNumber=3&strMetaTag>
- [38] Encapsulation resin. *Electrolube* [online]. UK, 2015 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
<http://www.electrolube.com/products/polyurethane-epoxy-resins.html>

Seznam symbolů, veličin a zkratk

ČSN	Česká státní norma
DPS	Deska plošných spojů
Ω/\square	Ohm na čtverec
ppm	Parts per milion; jedna miliontina celku
TLV	Tlustovrstvá technologie
TCE	Teplotní součinitel délkové roztažnosti
T_g	Teplota skelného přechodu

Seznam obrázků

Obr. 1 Vývoj technologie pouzďení [16]	9
Obr. 2 Pouzdro SIP [20] Pouzdro DIL [21]	10
Obr. 3 Pouzdro SOT-23-5 [22] Pouzdro SSOP [21].....	10
Obr. 4 Pouzdro PGA [23] Pouzdro BGA [24]	11
Obr. 5 Pouzdro QFP [26].....	12
Obr. 6 Technologie Multi Chip Module [27]	12
Obr. 7 Technologie Flip Chip [19]	13
Obr. 8 Rozdíl mezi běžnými technologiemi pouzďení a technologií WLP [34]	13
Obr. 9 Průřez DPS s vyobrazenými typy propojů [3]	17
Obr. 10 Struktury plastových materiálů [16]	20
Obr. 11 Obvod zalitý v epoxidu [31].....	21
Obr. 12 Silikonový ochranný lak aplikovaný na DPS [32]	22
Obr. 13 Zalévání samotného čipu (metoda Glop Top) [3]	24
Obr. 14 a) Tlakové nanášení s definovanou dobou. b) Nanášení prostřednictvím rotačního čerpadla [5]	25
Obr. 15 Lineární dispenzer [5].....	26
Obr. 16 a) Metoda vstřikování [15] b) Metoda lisování [15]	27
Obr. 17 Druhy fluidních vrstev [35]	29
Obr. 18 Podoba fluidizačního zařízení.....	30
Obr. 19 Popis klimatické komory	37
Obr. 20 Detail kontrolního panelu	38

Obr. 21 Podoba vhodného a nevhodného uložení vzorků v pracovním prostoru.....	38
Obr. 22 Finální podoba jednoho ze vzorků	40
Obr. 23 Podoba jednoho ze substrátů	42
Obr. 24 Místa orientačního měření tloušťky TLV odporových vrstev	43
Obr. 25 Hotové vzorky s horizontálním motivem a tloušťkou meandru 0,4 a 0,5 mm	44
Obr. 26 Měřicí stanoviště	44
Obr. 27 Použité fluidizační zařízení	45
Obr. 28 Laboratorní váha Radwag WPS 360/C/2	46
Obr. 29 Klimatická komora Shjianheng SDH01	47
Obr. 30 Hotové zapouzdřené vzorky	47
Obr. 31 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování zapouzdřených senzorů (10 Ω/\square)	49
Obr. 32 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování nezapouzdřených senzorů (10 Ω/\square)	50
Obr. 33 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování zapouzdřených senzorů potažených vrstvou dielektrika (10 Ω/\square)	51
Obr. 34 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování nezapouzdřených senzorů potažených vrstvou dielektrika (10 Ω/\square)	52
Obr. 35 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování zapouzdřených senzorů (100 Ω/\square)	53
Obr. 36 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování zapouzdřených senzorů (100 Ω/\square)	54
Obr. 37 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování zapouzdřených senzorů potažených vrstvou dielektrika (100 Ω/\square)	55

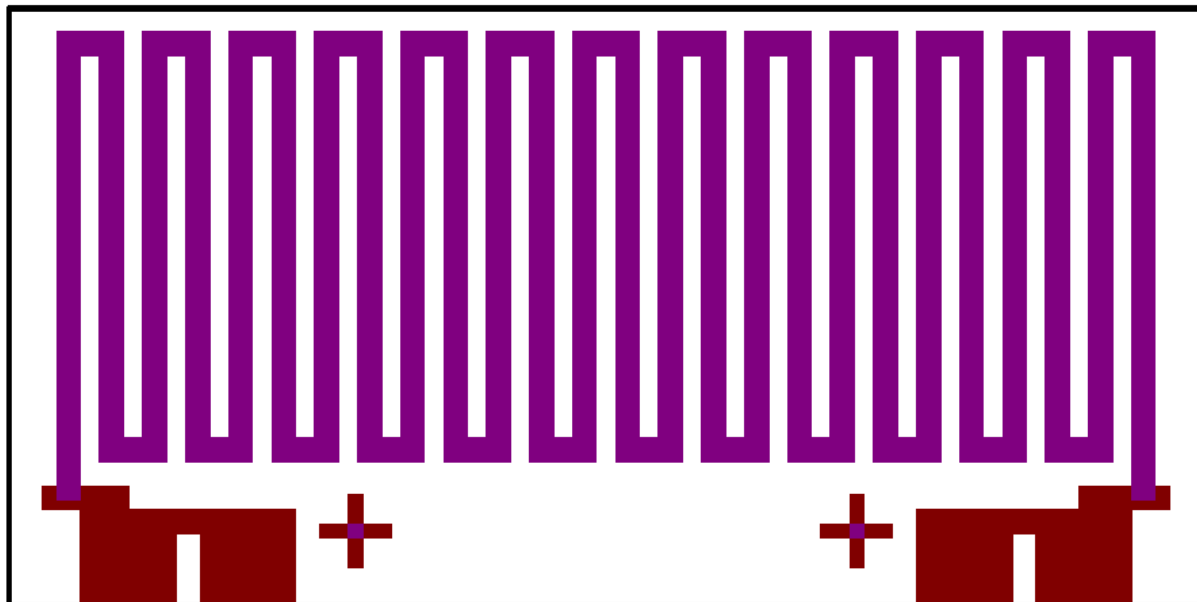
Obr. 38 Grafická podoba změny hodnot ΔR po klimatickém testování nezapouzdřených senzorů potažených vrstvou dielektrika ($100 \Omega/\square$)	56
Obr. 39 Metoda hmotnostního zisku	59
Obr. 40 Povrch fluidizovaného pouzdra zvětšený 25x	61
Obr. 41 Povrch fluidizovaného pouzdra zvětšený 50x	61

Seznam příloh

Příloha 1: Varianty podob navrhovaných vzorků	73
Příloha 2: Negativy pro výrobu motivů síť	82
Příloha 3: Naměřené hodnoty testovacích vzorků	84
Příloha 4: Grafické výstupy naměřených hodnot	113

Příloha 1: Varianty podob navrhovaných vzorků

Horizontální meandr – verze 1



Rozměry substrátu: 25x12,5 mm

Výstupní pady: 2x2 mm, rozteč 1,5 mm

Tloušťka meandru: 0,5 mm

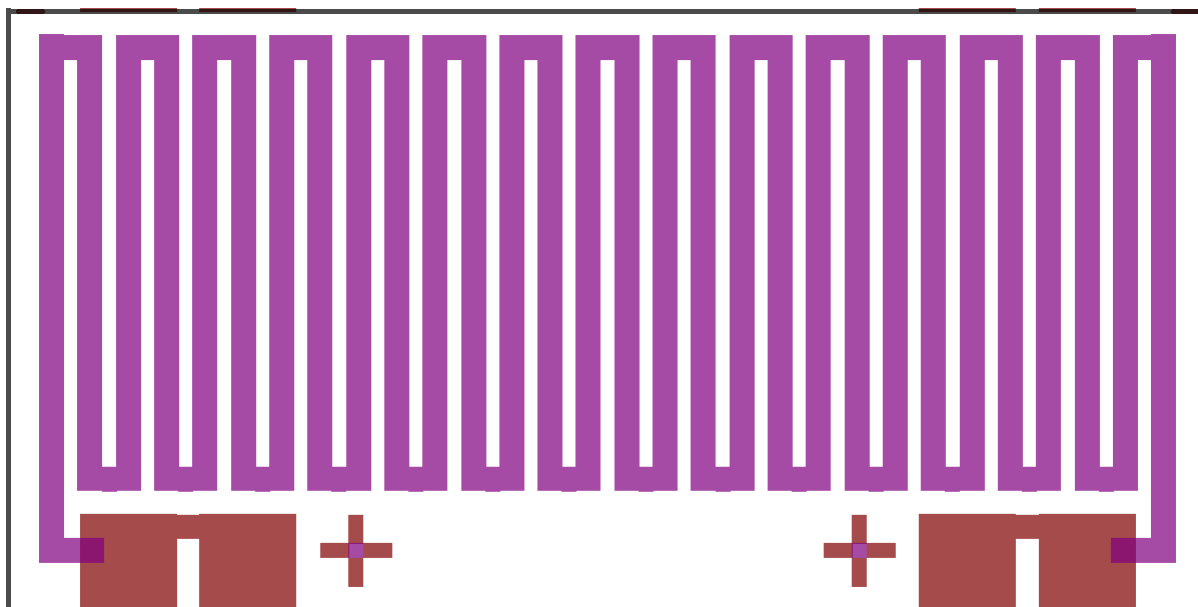
Izolační vzdálenost meandru: 0,4 mm

Výpočet odporu: $R = R_{\blacksquare} \cdot \frac{l}{w} = R_{\blacksquare} \cdot \left(\frac{420 \cdot 0,5}{0,5} + \frac{25 \cdot 0,4}{0,5} + \frac{50 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,5} \right) = R_{\blacksquare} \cdot 465$

Odporová pasta 10 Ω/\square : $R = 10 \cdot 465 = 4,65 \text{ k}\Omega$

Odporová pasta 100 Ω/\square : $R = 100 \cdot 465 = 46,5 \text{ k}\Omega$

Horizontální meandr – verze 2



Rozměry substrátu: 25x12,5 mm

Výstupní pady: 2x2 mm, rozteč 1,5 mm

Tloušťka meandru: 0,5 mm

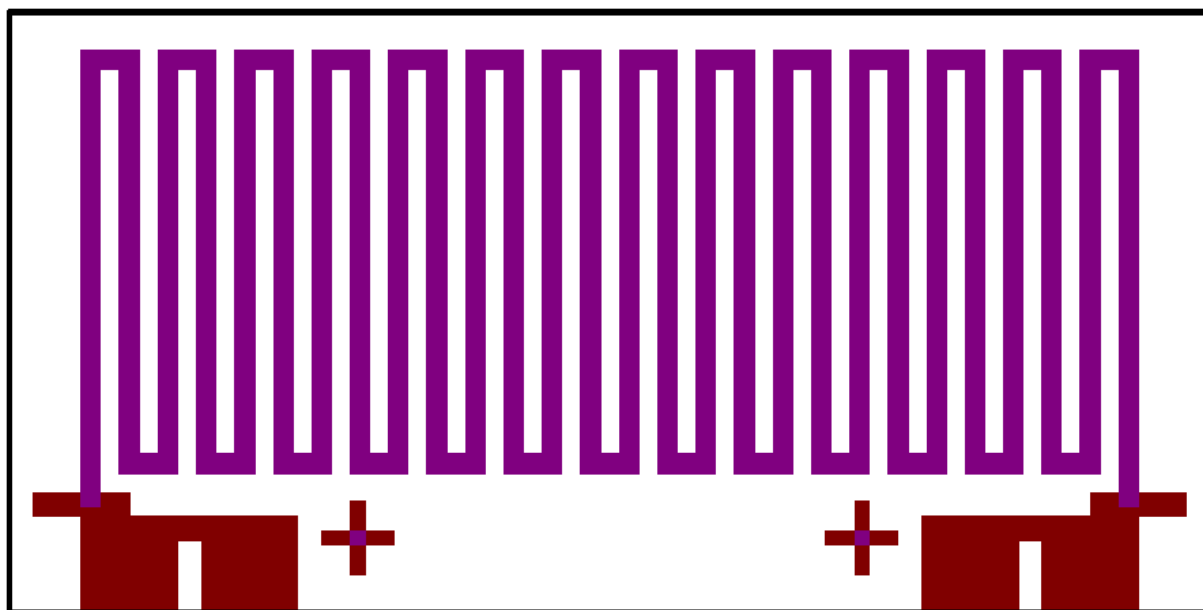
Izolační vzdálenost meandru: 0,3 mm

Výpočet odporu: $R = R_{\blacksquare} \cdot \frac{l}{w} = R_{\blacksquare} \cdot \left(\frac{516 \cdot 0,5}{0,5} + \frac{29 \cdot 0,3}{0,5} + \frac{60 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,5} + \frac{0,7}{0,5} \right) = R_{\blacksquare} \cdot 564,8$

Odporová pasta 10 Ω/\square : $R = 10 \cdot 564,8 = 5,648 \text{ k}\Omega$

Odporová pasta 100 Ω/\square : $R = 100 \cdot 564,8 = 56,48 \text{ k}\Omega$

Horizontální meandr – verze 3



Rozměry substrátu: 25x12,5 mm

Výstupní pady: 2x2 mm, rozteč 1,5 mm

Tloušťka meandru: 0,4 mm

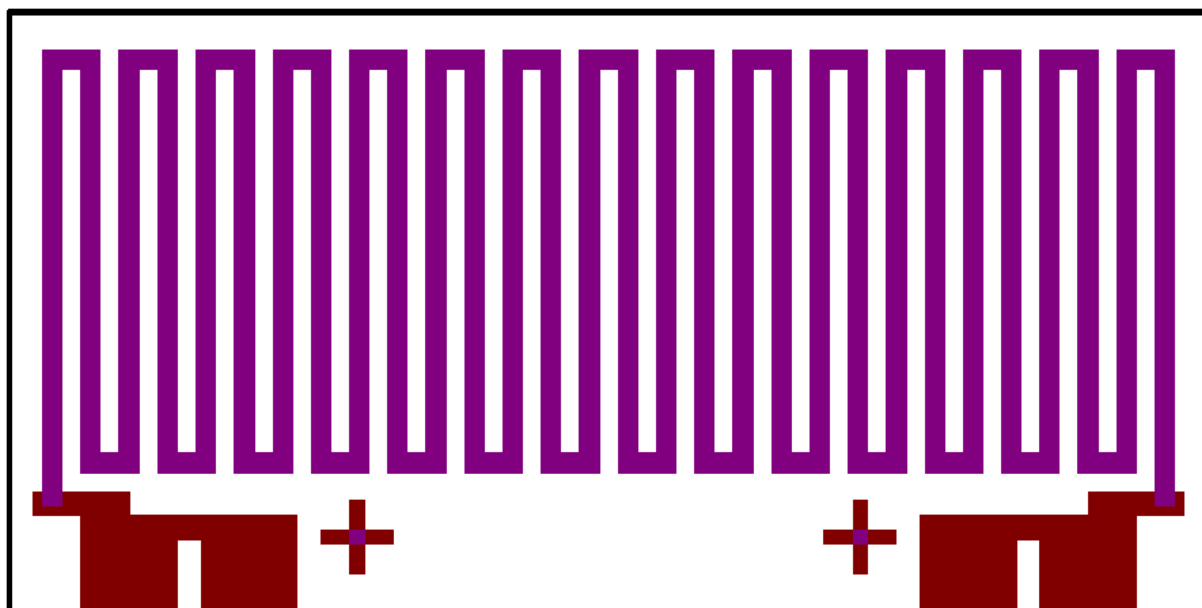
Izolační vzdálenost meandru: 0,4 mm

Výpočet odporu: $R = R_{\blacksquare} \cdot \frac{l}{w} = R_{\blacksquare} \cdot \left(\frac{564 \cdot 0,4}{0,4} + \frac{27 \cdot 0,4}{0,4} + \frac{54 \cdot 0,4 \cdot 0,5}{0,4} \right) = R_{\blacksquare} \cdot 618$

Odporová pasta 10 Ω/\square : $R = 10 \cdot 465 = 6,18 \text{ k}\Omega$

Odporová pasta 100 Ω/\square : $R = 100 \cdot 465 = 61,8 \text{ k}\Omega$

Horizontální meandr - verze 4



Rozměry substrátu: 25x12,5 mm

Výstupní pady: 2x2 mm, rozteč 1,5 mm

Tloušťka meandru: 0,4 mm

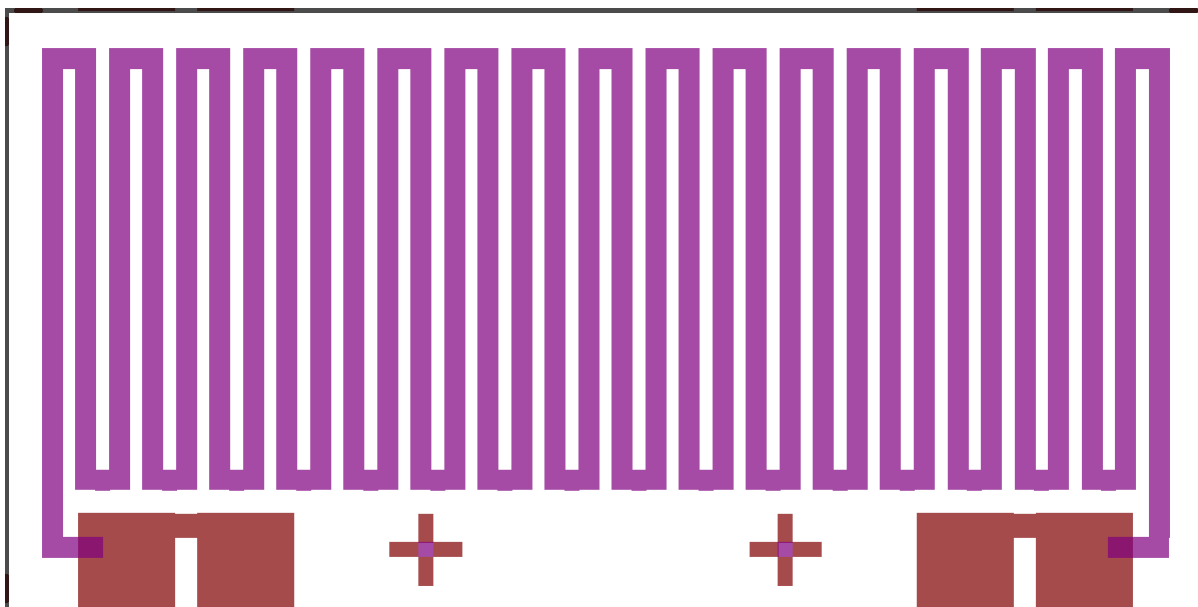
Izolační vzdálenost meandru: 0,4 mm

Výpočet odporu: $R = R_{\blacksquare} \cdot \frac{l}{w} = R_{\blacksquare} \cdot \left(\frac{604 \cdot 0,4}{0,4} + \frac{29 \cdot 0,4}{0,4} + \frac{58 \cdot 0,4 \cdot 0,5}{0,4} \right) = R_{\blacksquare} \cdot 662$

Odporová pasta 10 Ω/\square : $R = 10 \cdot 465 = 6,62 \text{ k}\Omega$

Odporová pasta 100 Ω/\square : $R = 100 \cdot 465 = 66,2 \text{ k}\Omega$

Horizontální meandr – verze 5



Rozměry substrátu: 25x12,5 mm

Výstupní pady: 2x2 mm, rozteč 2,54 mm

Tloušťka meandru: 0,4 mm

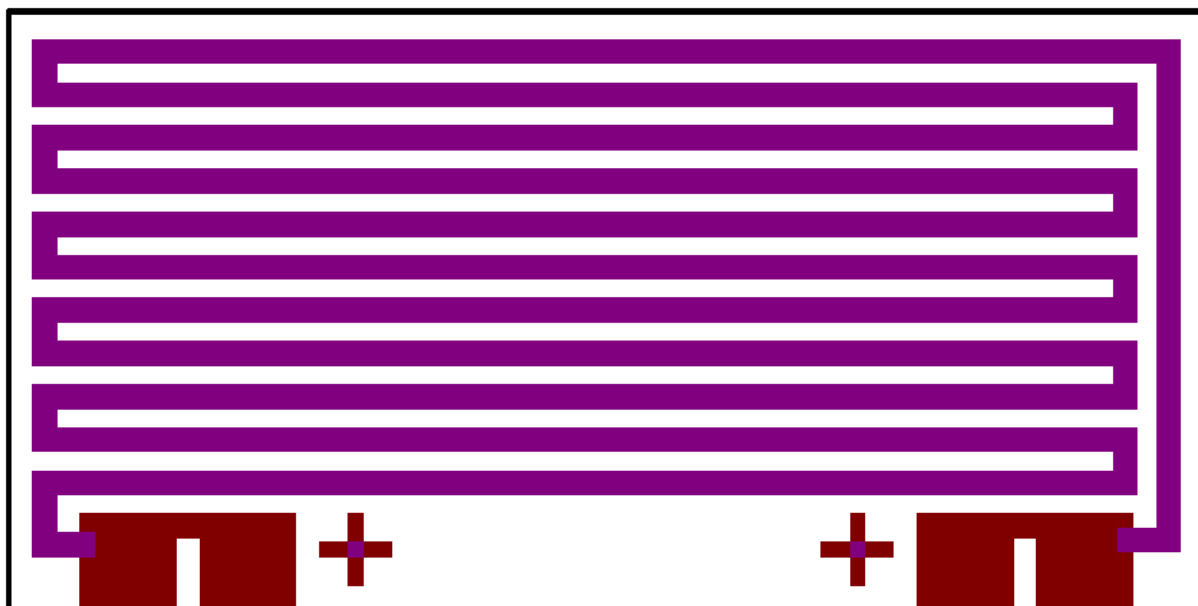
Izolační vzdálenost meandru: 0,3 mm

Výpočet odporu: $R = R_{\blacksquare} \cdot \frac{l}{w} = R_{\blacksquare} \cdot \left(\frac{721 \cdot 0,4}{0,4} + \frac{33 \cdot 0,3}{0,4} + \frac{68 \cdot 0,4 \cdot 0,5}{0,4} \right) = R_{\blacksquare} \cdot 769,9$

Odporová pasta 10 Ω/\square : $R = 10 \cdot 769,9 = 7,699 \text{ k}\Omega$

Odporová pasta 100 Ω/\square : $R = 100 \cdot 769,9 = 76,99 \text{ k}\Omega$

Vertikální meandr - verze 1



Rozměry substrátu: 25x12,5 mm

Výstupní pady: 2x2 mm, rozteč 1,5 mm

Tloušťka meandru: 0,5 mm

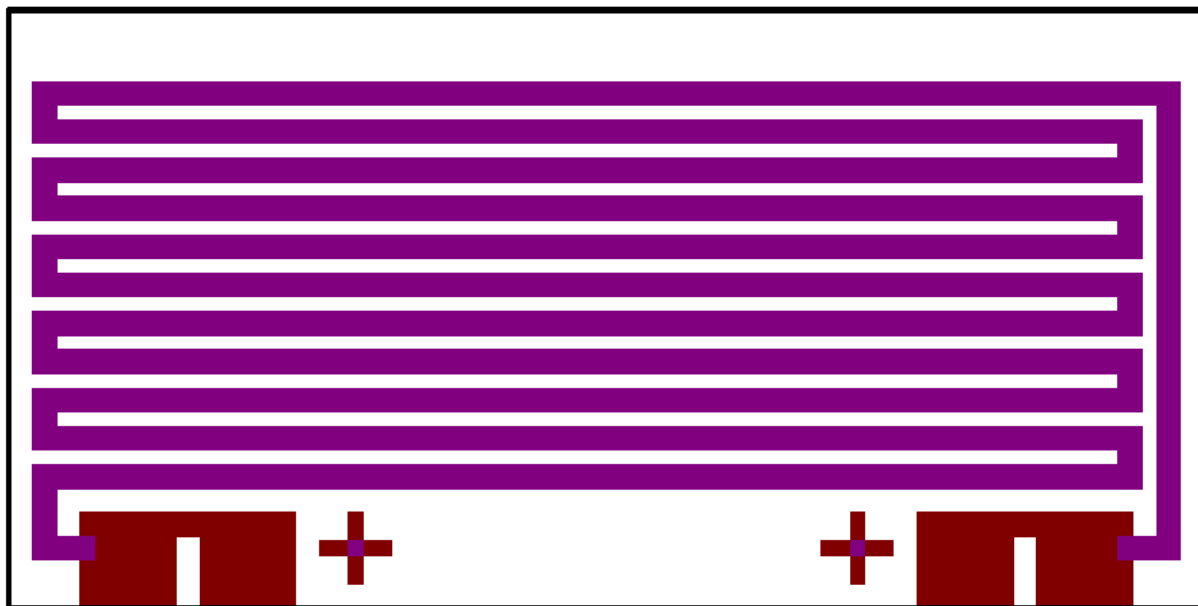
Izolační vzdálenost meandru: 0,4 mm

Výpočet odporu: $R = R_{\blacksquare} \cdot \frac{l}{w} = R_{\blacksquare} \cdot \left(\frac{511 \cdot 0,5}{0,5} + \frac{10 \cdot 0,4}{0,5} + \frac{24 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,5} \right) = R_{\blacksquare} \cdot 531$

Odporová pasta 10 Ω/\square : $R = 10 \cdot 531 = 5,31 \text{ k}\Omega$

Odporová pasta 100 Ω/\square : $R = 100 \cdot 531 = 53,1 \text{ k}\Omega$

Vertikální meandr - verze 2:



Rozměry substrátu: 25x12,5 mm

Výstupní pady: 2x2 mm, rozteč 1,5 mm

Tloušťka meandru: 0,5 mm

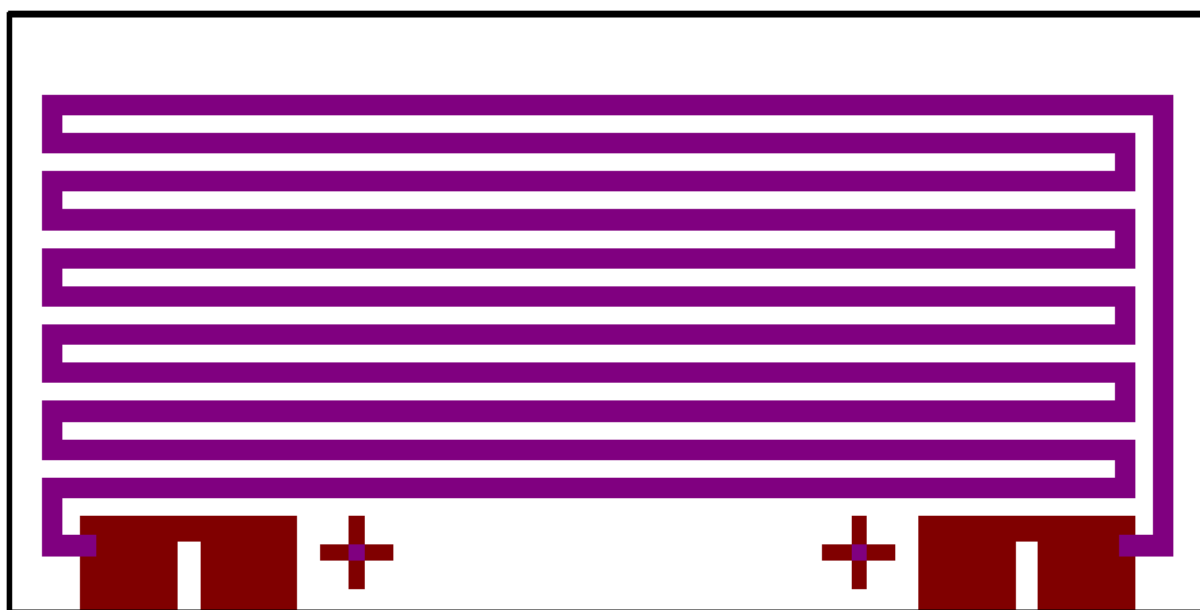
Izolační vzdálenost meandru: 0,3 mm

Výpočet odporu: $R = R_{\blacksquare} \cdot \frac{l}{w} = R_{\blacksquare} \cdot \left(\frac{508 \cdot 0,5}{0,5} + \frac{10 \cdot 0,3}{0,5} + \frac{24 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,5} + \frac{1 \cdot 0,1}{0,5} \right) = R_{\blacksquare} \cdot 526,2$

Odporová pasta 10 Ω/\square : $R = 10 \cdot 526,2 = 5,262 \text{ k}\Omega$

Odporová pasta 100 Ω/\square : $R = 100 \cdot 526,2 = 52,62 \text{ k}\Omega$

Vertikální meandr - verze 3



Rozměry substrátu: 25x12,5 mm

Výstupní pady: 2x2 mm, rozteč 1,5 mm

Tloušťka meandru: 0,4 mm

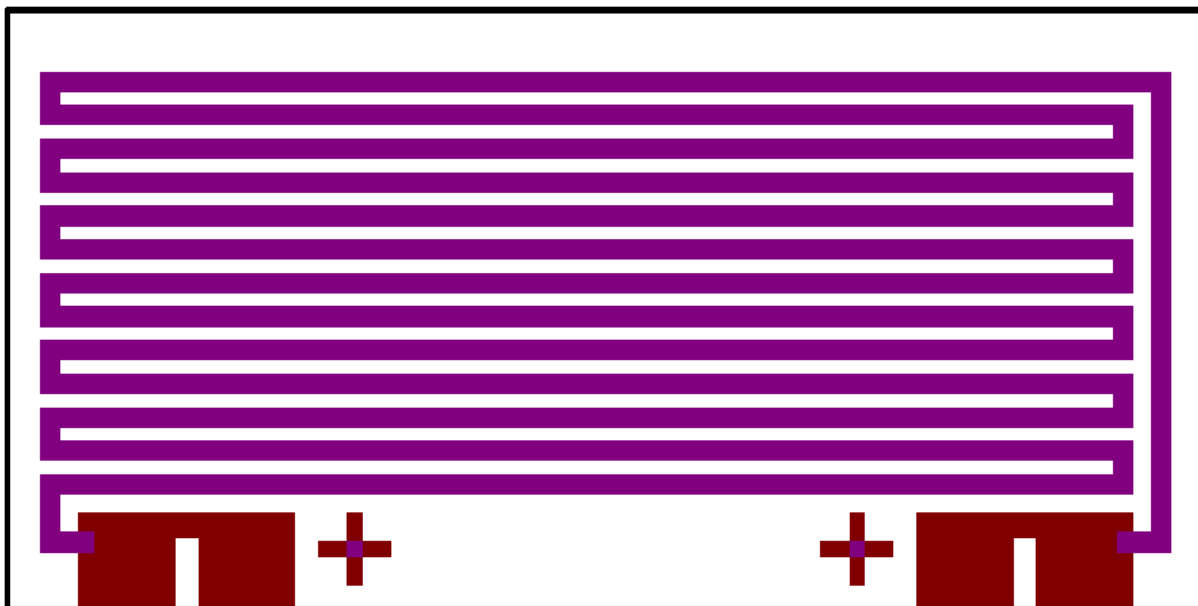
Izolační vzdálenost meandru: 0,4 mm

Výpočet odporu: $R = R_{\blacksquare} \cdot \frac{l}{w} = R_{\blacksquare} \cdot \left(\frac{633 \cdot 0,4}{0,4} + \frac{24 \cdot 0,5 \cdot 0,4}{0,4} \right) = R_{\blacksquare} \cdot 645$

Odporová pasta 10 Ω/\square : $R = 10 \cdot 645 = 6,45 \text{ k}\Omega$

Odporová pasta 100 Ω/\square : $R = 100 \cdot 645 = 64,5 \text{ k}\Omega$

Vertikální meandr - verze 4



Rozměry substrátu: 25x12,5 mm

Výstupní pady: 2x2 mm, rozteč 1,5 mm

Tloušťka meandru: 0,4 mm

Izolační vzdálenost meandru: 0,3 mm

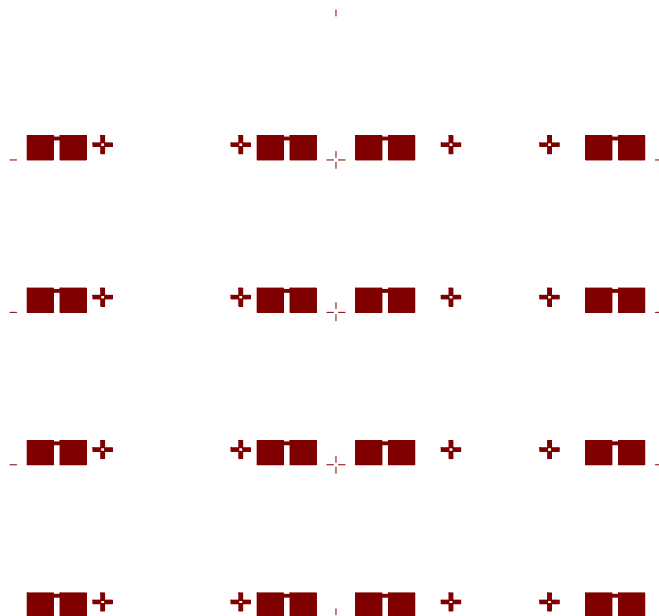
Výpočet odporu: $R = R_{\blacksquare} \cdot \frac{l}{w} = R_{\blacksquare} \cdot \left(\frac{744 \cdot 0,4}{0,4} + \frac{28 \cdot 0,5 \cdot 0,4}{0,4} + \frac{12 \cdot 0,3}{0,4} \right) = R_{\blacksquare} \cdot 767$

Odporová pasta 10 Ω/\square : $R = 10 \cdot 767 = 7,67 \text{ k}\Omega$

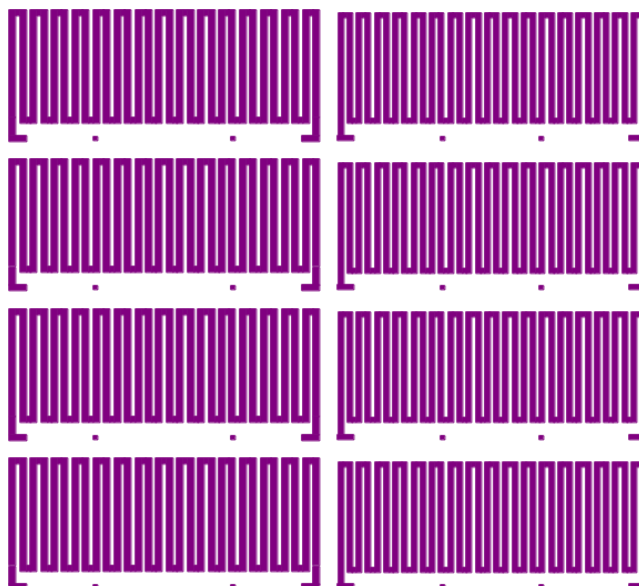
Odporová pasta 100 Ω/\square : $R = 100 \cdot 767 = 76,7 \text{ k}\Omega$

Příloha 2: Negativy pro výrobu motivů sít

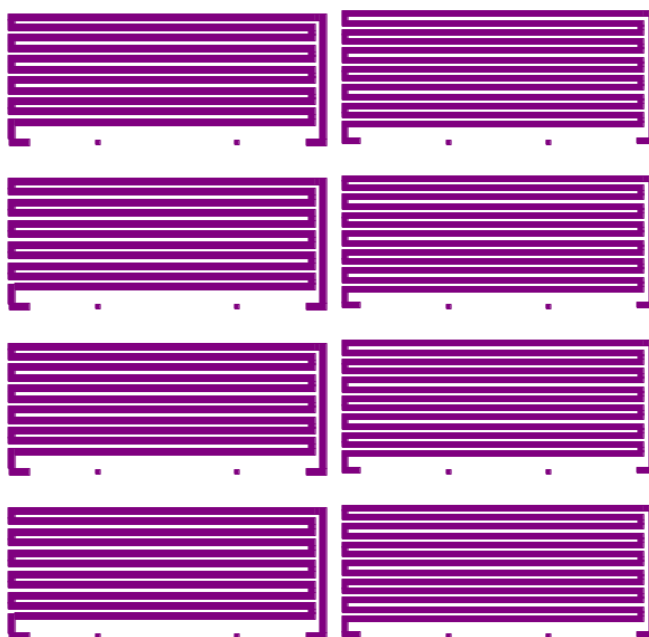
Vodivá vrstva



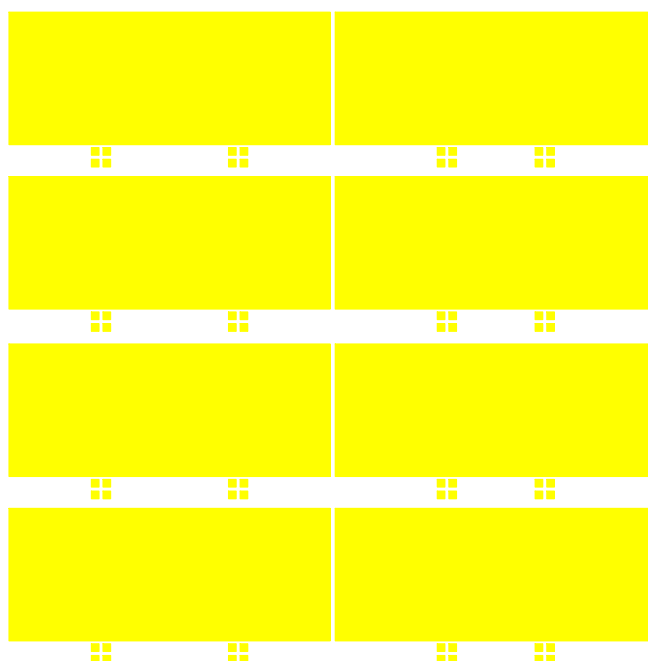
Odporová vrstva – horizontální meandr



Odporová vrstva – vertikální meandr



Dielektrická vrstva



Příloha 3: Naměřené hodnoty testovacích vzorků

Horizontální meandr 10 Ω/\square - měření po sítotisku

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
1	0,4	1,000	12,254	12,254
2	0,4	1,000	11,765	11,765
3	0,4	1,000	11,579	11,579
4	0,4	1,000	12,535	12,535
5	0,4	1,000	12,414	12,391
6	0,4	1,000	11,897	11,897
7	0,4	1,000	12,259	12,259
8	0,4	1,000	12,391	12,391
9	0,4	1,000	12,055	12,055
10	0,4	1,000	11,921	11,921
11	0,4	1,000	11,882	11,882
12	0,4	defekt		
Průměrná hodnota				12,084
Předpokládaná hodnota				7,690
Směrodatná odchylka				0,302
Rozptyl				0,956
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
13	0,5	1,000	8,226	8,226
14	0,5	1,000	8,633	8,633
15	0,5	1,000	8,677	8,677
16	0,5	1,000	8,764	8,764
17	0,5	1,000	8,893	8,893
18	0,5	1,000	8,303	8,303
19	0,5	1,000	8,369	8,369
20	0,5	1,000	7,976	7,976
21	0,5	1,000	8,425	8,425
22	0,5	1,000	8,324	8,324
23	0,5	1,000	8,080	8,080
24	0,5	1,000	8,024	8,024
Průměrná hodnota				8,391
Předpokládaná hodnota				5,650
Směrodatná odchylka				0,298
Rozptyl				0,917

Vertikální meandr 10 Ω/\square - měření po sítotisku

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
25	0,4	1,000	13,430	13,430
26	0,4	1,000	12,641	12,641
27	0,4	1,000	13,844	13,844
28	0,4	1,000	13,661	13,661
29	0,4	1,000	13,855	13,855
30	0,4	1,000	13,212	13,212
31	0,4	1,000	12,900	12,900
32	0,4	1,000	13,325	13,325
33	0,4	defekt		
34	0,4	defekt		
35	0,4	defekt		
36	0,4	defekt		
Průměrná hodnota				13,359
Předpokládaná hodnota				7,670
Směrodatná odchylka				0,435
Rozptyl				1,214
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
37	0,5	1,000	9,401	9,401
38	0,5	1,000	9,653	9,653
39	0,5	1,000	9,325	9,325
40	0,5	1,000	9,705	9,705
41	0,5	1,000	10,04	10,040
42	0,5	1,000	9,89	9,890
43	0,5	defekt		
44	0,5	1,000	9,613	9,613
45	0,5	1,000	9,596	9,596
46	0,5	1,000	9,514	9,514
47	0,5	defekt		
48	0,5	1,000	10,083	10,083
Průměrná hodnota				9,661
Předpokládaná hodnota				5,260
Směrodatná odchylka				0,252
Rozptyl				0,758

Vertikální meandr 10 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po sítotisku

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
49	0,4	1,000	26,701	26,701
50	0,4	1,000	28,002	28,002
51	0,4	1,000	27,845	27,845
52	0,4	1,000	28,535	28,535
53	0,4	1,000	28,213	28,213
54	0,4	1,000	25,634	25,634
55	0,4	1,000	26,859	26,859
56	0,4	1,000	26,057	26,057
Průměrná hodnota				27,231
Předpokládaná hodnota				7,670
Směrodatná odchylka				1,068
Rozptyl				2,901
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
57	0,5	1,000	20,185	20,185
58	0,5	1,000	19,084	19,084
59	0,5	1,000	20,563	20,563
60	0,5	1,000	19,478	19,478
61	0,5	1,000	19,166	19,166
62	0,5	1,000	20,022	20,022
63	0,5	1,000	20,606	20,606
64	0,5	1,000	20,105	20,105
Průměrná hodnota				19,901
Předpokládaná hodnota				5,260
Směrodatná odchylka				0,593
Rozptyl				1,522

Horizontální meandr 10 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po sítotisku

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
65	0,4	1,000	23,404	23,404
66	0,4	1,000	24,324	24,324
67	0,4	1,000	24,702	24,702
68	0,4	1,000	24,703	24,703
69	0,4	1,000	23,985	23,985
70	0,4	1,000	23,853	23,853
71	0,4	1,000	24,549	24,549
72	0,4	1,000	24,521	24,521
Průměrná hodnota				24,255
Předpokládaná hodnota				7,690
Směrodatná odchylka				0,466
Rozptyl				1,299
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
73	0,5	1,000	16,759	16,759
74	0,5	1,000	16,982	16,982
75	0,5	1,000	16,979	16,979
76	0,5	1,000	17,401	17,401
77	0,5	1,000	16,226	16,226
78	0,5	1,000	17,925	17,925
79	0,5	1,000	16,241	16,241
80	0,5	1,000	16,078	16,078
Průměrná hodnota				16,824
Předpokládaná hodnota				5,650
Směrodatná odchylka				0,638
Rozptyl				1,847

Horizontální meandr 100 Ω/\square - měření po sítotisku

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
81	0,4	100	13,106	131,060
82	0,4	100	12,756	127,560
83	0,4	100	12,899	128,990
84	0,4	100	13,669	136,690
85	0,4	100	13,777	137,770
86	0,4	100	13,540	135,400
87	0,4	100	13,770	137,700
88	0,4	100	13,529	135,290
Průměrná hodnota				133,808
Předpokládaná hodnota				76,900
Směrodatná odchylka				4,030
Rozptyl				10,210
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
89	0,5	100	9,746	97,460
90	0,5	100	9,699	96,990
91	0,5	100	9,633	96,330
92	0,5	100	9,862	98,620
93	0,5	100	9,435	94,350
94	0,5	100	9,315	93,150
95	0,5	100	9,208	92,080
96	0,5	100	9,316	93,160
Průměrná hodnota				95,268
Předpokládaná hodnota				52,600
Směrodatná odchylka				2,393
Rozptyl				6,540

Vertikální meandr 100 Ω/\square - měření po sítotisku

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
97	0,4	100	15,131	151,310
98	0,4	100	15,188	151,880
99	0,4	100	15,260	152,600
100	0,4	100	14,936	149,360
101	0,4	100	14,074	140,740
102	0,4	100	13,847	138,470
103	0,4	100	13,956	139,560
104	0,4	100	14,092	140,920
Průměrná hodnota				145,605
Předpokládaná hodnota				76,700
Směrodatná odchylka				6,188
Rozptyl				14,130
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
105	0,5	100	10,161	101,610
106	0,5	100	10,337	103,370
107	0,5	100	10,068	100,680
108	0,5	100	10,132	101,320
109	0,5	100	10,346	103,460
110	0,5	100	10,241	102,410
111	0,5	100	10,169	101,690
112	0,5	100	10,204	102,040
Průměrná hodnota				102,073
Předpokládaná hodnota				52,600
Směrodatná odchylka				0,970
Rozptyl				2,780

Horizontální meandr 100 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po sítotisku

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
113	0,4	50	20,639	412,780
114	0,4	50	20,924	418,480
115	0,4	50	21,107	422,140
116	0,4	50	20,971	419,420
117	0,4	50	20,360	407,200
118	0,4	50	20,443	408,860
119	0,4	50	19,993	399,860
120	0,4	50	20,346	406,920
Průměrná hodnota				411,958
Předpokládaná hodnota				76,900
Směrodatná odchylka				7,62089
Rozptyl				22,280
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
121	0,5	50	15,857	317,140
122	0,5	50	15,522	310,440
123	0,5	50	15,627	312,540
124	0,5	50	15,489	309,780
125	0,5	50	16,775	335,500
126	0,5	50	16,097	321,940
127	0,5	50	15,994	319,880
128	0,5	50	15,805	316,100
Průměrná hodnota				317,915
Předpokládaná hodnota				52,600
Směrodatná odchylka				8,316
Rozptyl				25,720

Vertikální meandr 100 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po sítotisku

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
129	0,4	50	20,613	412,260
130	0,4	50	20,901	418,020
131	0,4	50	20,435	408,700
132	0,4	50	20,355	407,100
133	0,4	50	20,161	403,220
134	0,4	50	20,114	402,280
135	0,4	50	16,183	323,660
136	0,4	50	14,951	299,020
Průměrná hodnota				384,283
Předpokládaná hodnota				76,700
Směrodatná odchylka				45,771
Rozptyl				119,000
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
137	0,5	50	15,026	300,520
138	0,5	50	14,880	297,600
139	0,5	50	14,643	292,860
140	0,5	50	14,288	285,760
141	0,5	50	15,038	300,760
142	0,5	50	14,662	293,240
143	0,5	50	14,999	299,980
144	0,5	50	14,020	280,400
Průměrná hodnota				293,890
Předpokládaná hodnota				52,600
Směrodatná odchylka				7,479
Rozptyl				20,360

Horizontální meandr 10 Ω/\square - měření po fluidizaci

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
1	0,4	1,000	12,254	12,254
2	0,4	1,000	11,754	11,754
3	0,4	1,000	11,560	11,560
4	0,4	1,000	12,531	12,531
5	0,4	1,000	12,380	12,380
6	0,4	1,000	11,897	11,897
7	0,4	1,000	12,259	12,259
8	0,4	1,000	12,391	12,391
9	0,4	1,000	12,055	12,055
10	0,4	1,000	11,918	11,918
11	0,4	1,000	11,882	11,882
Průměrná hodnota				12,080
Směrodatná odchylka				0,305
Rozptyl				0,971
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
13	0,5	1,000	8,223	8,223
14	0,5	1,000	8,631	8,631
15	0,5	1,000	8,670	8,670
16	0,5	1,000	8,753	8,753
17	0,5	1,000	8,894	8,894
18	0,5	1,000	8,298	8,298
19	0,5	1,000	8,359	8,359
20	0,5	1,000	7,956	7,956
21	0,5	1,000	8,425	8,425
22	0,5	1,000	8,324	8,324
23	0,5	1,000	8,060	8,060
24	0,5	1,000	8,024	8,024
Průměrná hodnota				8,418
Směrodatná odchylka				0,292
Rozptyl				0,938



Zapouzdřené vzorky



Nepouzduřené vzorky

Vertikální meandr 10 Ω/\square - měření po fluidizaci

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
25	0,4	1,000	13,423	13,423
26	0,4	1,000	12,641	12,641
27	0,4	1,000	13,826	13,826
28	0,4	1,000	13,656	13,656
29	0,4	1,000	13,854	13,854
30	0,4	1,000	13,204	13,204
31	0,4	1,000	12,900	12,900
32	0,4	1,000	13,325	13,325
33	0,4	defekt		
34	0,4	defekt		
35	0,4	defekt		
36	0,4	defekt		
Průměrná hodnota				13,354
Směrodatná odchylka				0,432
Rozptyl				1,213
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
37	0,5	1,000	9,398	9,398
38	0,5	1,000	9,645	9,645
39	0,5	1,000	9,327	9,327
40	0,5	1,000	9,700	9,700
41	0,5	1,000	10,04	10,040
42	0,5	1,000	9,890	9,890
44	0,5	1,000	9,713	9,713
45	0,5	1,000	9,593	9,593
46	0,5	1,000	9,513	9,513
48	0,5	1,000	10,083	10,083
Průměrná hodnota				9,690
Směrodatná odchylka				0,253
Rozptyl				0,756



Zapouzdřené vzorky



Nepouzďřené vzorky

Vertikální meandr 10 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po fluidizaci

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
49	0,4	1,000	26,683	26,683
50	0,4	1,000	27,973	27,973
51	0,4	1,000	27,832	27,832
52	0,4	1,000	28,535	28,535
53	0,4	1,000	28,213	28,213
54	0,4	1,000	25,634	25,634
55	0,4	1,000	26,843	26,843
56	0,4	1,000	26,045	26,045
Průměrná hodnota				27,220
Směrodatná odchylka				1,033
Rozptyl				2,901
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
57	0,5	1,000	20,185	20,185
58	0,5	1,000	19,084	19,084
59	0,5	1,000	20,563	20,563
60	0,5	1,000	19,472	19,472
61	0,5	1,000	19,148	19,148
62	0,5	1,000	20,007	20,007
63	0,5	1,000	20,594	20,594
64	0,5	1,000	20,084	20,084
Průměrná hodnota				19,892
Směrodatná odchylka				0,635
Rozptyl				1,510



Zapouzdřené vzorky



Nepouzduřené vzorky

Horizontální meandr 10 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po fluidizaci

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
65	0,4	1,000	23,398	23,398
66	0,4	1,000	24,315	24,315
67	0,4	1,000	24,695	24,695
68	0,4	1,000	24,692	24,692
69	0,4	1,000	23,965	23,965
70	0,4	1,000	23,853	23,853
71	0,4	1,000	24,549	24,549
72	0,4	1,000	24,521	24,521
Průměrná hodnota				24,249
Směrodatná odchylka				0,490
Rozptyl				1,297
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
73	0,5	1,000	16,756	16,756
74	0,5	1,000	16,978	16,978
75	0,5	1,000	16,976	16,976
76	0,5	1,000	17,390	17,390
77	0,5	1,000	16,223	16,223
78	0,5	1,000	17,925	17,925
79	0,5	1,000	16,241	16,241
80	0,5	1,000	16,078	16,078
Průměrná hodnota				16,821
Směrodatná odchylka				0,607
Rozptyl				1,702



Zapouzdřené vzorky



Nepouzduřené vzorky

Horizontální meandr 100 Ω/\square - měření po fluidizaci

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
81	0,4	100	13,106	131,060
82	0,4	100	12,756	127,560
83	0,4	100	12,899	128,990
84	0,4	100	13,667	136,670
85	0,4	100	13,778	137,780
86	0,4	100	13,539	135,390
87	0,4	100	13,769	137,690
88	0,4	100	13,527	135,270
Průměrná hodnota				133,801
Směrodatná odchylka				4,026
Rozptyl				10,220
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
89	0,5	100	9,745	97,450
90	0,5	100	9,697	96,970
91	0,5	100	9,630	96,300
92	0,5	100	9,860	98,600
93	0,5	100	9,435	94,350
94	0,5	100	9,315	93,150
95	0,5	100	9,208	92,080
96	0,5	100	9,316	93,160
Průměrná hodnota				95,258
Směrodatná odchylka				2,383
Rozptyl				6,520



Zapouzdřené vzorky



Nepouzduřené vzorky

Vertikální meandr 100 Ω/\square - měření po fluidizaci

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
97	0,4	100	15,129	151,290
98	0,4	100	15,188	151,880
99	0,4	100	15,258	152,580
100	0,4	100	14,937	149,370
101	0,4	100	14,068	140,680
102	0,4	100	13,847	138,470
103	0,4	100	13,956	139,560
104	0,4	100	14,092	140,920
Průměrná hodnota				145,594
Směrodatná odchylka				6,190
Rozptyl				14,110
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
105	0,5	100	10,157	101,570
106	0,5	100	10,336	103,360
107	0,5	100	10,065	100,650
108	0,5	100	10,125	101,250
109	0,5	100	10,345	103,450
110	0,5	100	10,241	102,410
111	0,5	100	10,173	101,730
112	0,5	100	10,204	102,040
Průměrná hodnota				102,058
Směrodatná odchylka				0,981
Rozptyl				2,800



Zapouzdřené vzorky



Nepouzďřené vzorky

Horizontální meandr 100 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po fluidizaci

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
113	0,4	50	20,638	412,760
114	0,4	50	20,922	418,440
115	0,4	50	21,106	422,120
116	0,4	50	20,971	419,420
117	0,4	50	20,359	407,180
118	0,4	50	20,441	408,820
119	0,4	50	19,993	399,860
120	0,4	50	20,346	406,920
Průměrná hodnota				411,940
Směrodatná odchylka				7,616
Rozptyl				22,260
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
121	0,5	50	15,856	317,120
122	0,5	50	15,522	310,440
123	0,5	50	15,627	312,540
124	0,5	50	15,489	309,780
125	0,5	50	16,775	335,500
126	0,5	50	16,095	321,900
127	0,5	50	15,990	319,800
128	0,5	50	15,805	316,100
Průměrná hodnota				317,898
Směrodatná odchylka				8,311
Rozptyl				25,720



Zapouzdřené vzorky



Nepouzďřené vzorky

Vertikální meandr 100 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po fluidizaci

Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
129	0,4	50	20,610	412,200
130	0,4	50	20,899	417,980
131	0,4	50	20,435	408,700
132	0,4	50	20,354	407,080
133	0,4	50	20,158	403,160
134	0,4	50	20,113	402,260
135	0,4	50	16,183	323,660
136	0,4	50	14,951	299,020
Průměrná hodnota				384,258
Směrodatná odchylka				32,537
Rozptyl				94,320
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
137	0,5	50	15,026	300,520
138	0,5	50	14,875	297,500
139	0,5	50	14,642	292,840
140	0,5	50	14,288	285,760
141	0,5	50	15,036	300,720
142	0,5	50	14,661	293,220
143	0,5	50	14,999	299,980
144	0,5	50	14,020	280,400
Průměrná hodnota				293,868
Směrodatná odchylka				5,524
Rozptyl				14,960



Zapouzdřené vzorky



Nepouzdřené vzorky

Horizontální meandr 10 Ω/\square - měření po namáhání vlhkým teplem

		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
1	0,4	1,000	12,241	12,241	1,000	12,234	12,234
2	0,4	1,000	11,742	11,742	1,000	11,737	11,737
3	0,4	1,000	11,556	11,556	1,000	11,549	11,549
4	0,4	1,000	12,533	12,533	1,000	12,526	12,526
5	0,4	1,000	12,377	12,377	1,000	12,369	12,369
6	0,4	1,000	11,896	11,896	1,000	11,894	11,891
7	0,4	1,000	12,257	12,257	1,000	12,256	12,256
8	0,4	1,000	12,386	12,386	1,000	12,381	12,381
9	0,4	1,000	12,050	12,050	1,000	12,046	12,046
10	0,4	1,000	11,916	11,916	1,000	11,906	11,906
11	0,4	1,000	11,880	11,880	1,000	11,871	11,871
Průměrná hodnota				12,076			12,070
Směrodatná odchylka				0,306			0,306
Rozptyl				0,977			0,977
		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
13	0,5	1,000	8,220	8,220	1,000	8,218	8,218
14	0,5	1,000	8,625	8,625	1,000	8,623	8,623
15	0,5	1,000	8,668	8,668	1,000	8,663	8,663
16	0,5	1,000	8,733	8,759	1,000	8,750	8,750
17	0,5	1,000	8,856	8,875	1,000	8,867	8,867
18	0,5	1,000	8,292	8,292	1,000	8,289	8,289
19	0,5	1,000	8,352	8,352	1,000	8,353	8,353
20	0,5	1,000	7,950	7,950	1,000	7,941	7,941
21	0,5	1,000	8,431	8,431	1,000	8,427	8,427
22	0,5	1,000	8,321	8,321	1,000	8,320	8,320
23	0,5	1,000	8,062	8,062	1,000	8,050	8,050
24	0,5	1,000	8,021	8,021	1,000	8,019	8,019
Průměrná hodnota				8,414			8,409
Směrodatná odchylka				0,291			0,291
Rozptyl				0,925			0,926



Zapouzdřené vzorky



Nepouzdřené vzorky

Vertikální meandr 10 Ω/\square - měření po namáhání vlhkým teplem

		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
25	0,4	1,000	13,418	13,418	1,000	13,406	13,406
26	0,4	1,000	12,611	12,611	1,000	12,608	12,608
27	0,4	1,000	13,836	13,836	1,000	13,824	13,824
28	0,4	1,000	13,645	13,645	1,000	13,632	13,632
29	0,4	1,000	13,844	13,844	1,000	13,829	13,829
30	0,4	1,000	13,195	13,195	1,000	13,187	13,187
31	0,4	1,000	12,89	12,890	1,000	12,878	12,878
32	0,4	1,000	13,327	13,327	1,000	13,321	13,321
33	0,4	defekt			defekt		
34	0,4	defekt			defekt		
35	0,4	defekt			defekt		
36	0,4	defekt			defekt		
Průměrná hodnota				13,346			13,336
Směrodatná odchylka				0,440			0,437
Rozptyl				1,233			1,221
		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
37	0,5	1,000	9,399	9,399	1,000	9,391	9,391
38	0,5	1,000	9,627	9,627	1,000	9,625	9,625
39	0,5	1,000	9,319	9,319	1,000	9,31	9,310
40	0,5	1,000	9,698	9,698	1,000	9,689	9,689
41	0,5	1,000	10,037	10,037	1,000	10,035	10,035
42	0,5	1,000	9,872	9,872	1,000	9,861	9,861
44	0,5	1,000	9,694	9,694	1,000	9,689	9,689
45	0,5	1,000	9,58	9,580	1,000	9,568	9,568
46	0,5	1,000	9,505	9,505	1,000	9,489	9,489
48	0,5	1,000	10,081	10,081	1,000	10,078	10,078
Průměrná hodnota				9,681			9,674
Směrodatná odchylka				0,253			0,256
Rozptyl				0,762			0,768



Zapouzdřené vzorky



Nepouzdřené vzorky

Vertikální meandr 10 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po namáhání vlhkým teplem

		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
49	0,4	1,000	26,664	26,664	1,000	26,635	26,635
50	0,4	1,000	27,956	27,956	1,000	27,946	27,921
51	0,4	1,000	27,800	27,800	1,000	27,791	27,791
52	0,4	1,000	28,514	28,514	1,000	28,502	28,502
53	0,4	1,000	28,141	28,141	1,000	28,139	28,139
54	0,4	1,000	25,611	25,611	1,000	25,621	25,621
55	0,4	1,000	26,818	26,818	1,000	26,815	26,815
56	0,4	1,000	26,027	26,027	1,000	26,006	26,006
Průměrná hodnota				27,191			27,179
Směrodatná odchylka				1,027			1,021
Rozptyl				2,903			2,881
		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
57	0,5	1,000	20,174	20,174	1,000	20,183	20,183
58	0,5	1,000	19,065	19,065	1,000	19,038	19,038
59	0,5	1,000	20,549	20,549	1,000	20,546	20,546
60	0,5	1,000	19,456	19,456	1,000	19,448	19,448
61	0,5	1,000	19,125	19,125	1,000	19,090	19,090
62	0,5	1,000	19,980	19,980	1,000	19,945	19,945
63	0,5	1,000	20,563	20,563	1,000	20,541	20,541
64	0,5	1,000	20,051	20,051	1,000	20,032	20,032
Průměrná hodnota				19,870			19,853
Směrodatná odchylka				0,635			0,642
Rozptyl				1,498			1,508



Zapouzdřené vzorky



Nepouzdřené vzorky

Horizontální meandr 10 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po namáhání vlhkým teplem

		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
65	0,4	1,000	23,355	23,355	1,000	23,312	23,312
66	0,4	1,000	24,298	24,298	1,000	24,280	24,280
67	0,4	1,000	24,706	24,706	1,000	24,690	24,690
68	0,4	1,000	24,646	24,646	1,000	24,628	24,628
69	0,4	1,000	23,944	23,944	1,000	23,924	23,924
70	0,4	1,000	23,830	23,830	1,000	23,817	23,817
71	0,4	1,000	24,512	24,512	1,000	24,490	24,490
72	0,4	1,000	24,478	24,478	1,000	24,465	24,465
Průměrná hodnota				24,220			24,201
Směrodatná odchylka				0,497			0,503
Rozptyl				1,351			1,378
		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
73	0,5	1,000	16,730	16,730	1,000	16,723	16,723
74	0,5	1,000	16,932	16,932	1,000	16,919	16,919
75	0,5	1,000	16,966	16,966	1,000	16,961	16,961
76	0,5	1,000	17,378	17,378	1,000	17,368	17,368
77	0,5	1,000	16,200	16,200	1,000	16,194	16,194
78	0,5	1,000	17,887	17,887	1,000	17,867	17,867
79	0,5	1,000	16,205	16,205	1,000	16,199	16,199
80	0,5	1,000	16,085	16,085	1,000	16,060	16,060
Průměrná hodnota				16,798			16,786
Směrodatná odchylka				0,607			0,603
Rozptyl				1,687			1,673



Zapouzdřené vzorky



Nepouzdřené vzorky

Horizontální meandr 100 Ω/\square - měření po namáhání vlhkým teplem

		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
81	0,4	100	13,095	130,950	100	13,097	130,970
82	0,4	100	12,760	127,600	100	12,758	127,580
83	0,4	100	12,901	129,010	100	12,898	128,980
84	0,4	100	13,664	136,640	100	13,660	136,600
85	0,4	100	13,773	137,730	100	13,769	137,690
86	0,4	100	13,535	135,350	100	13,532	135,320
87	0,4	100	13,766	137,660	100	13,765	137,650
88	0,4	100	13,520	135,200	100	13,517	135,170
Průměrná hodnota				133,768			133,745
Směrodatná odchylka				4,005			3,998
Rozptyl				10,130			10,110
		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
89	0,5	100	9,743	97,430	100	9,740	97,400
90	0,5	100	9,694	96,940	100	9,693	96,930
91	0,5	100	9,627	96,270	100	9,625	96,250
92	0,5	100	9,857	98,570	100	9,856	98,560
93	0,5	100	9,433	94,330	100	9,430	94,300
94	0,5	100	9,308	93,080	100	9,307	93,070
95	0,5	100	9,209	92,090	100	9,207	92,070
96	0,5	100	9,310	93,100	100	9,311	93,110
Průměrná hodnota				95,226			95,211
Směrodatná odchylka				2,385			2,383
Rozptyl				6,480			6,490



Zapouzdřené vzorky



Nepouzďřené vzorky

Vertikální meandr 100 Ω/\square - měření po namáhání vlhkým teplem

		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
97	0,4	100	15,121	151,210	100	15,118	151,180
98	0,4	100	15,186	151,860	100	15,183	151,830
99	0,4	100	15,252	152,520	100	15,248	152,480
100	0,4	100	14,928	149,280	100	14,926	149,260
101	0,4	100	14,07	140,700	100	14,067	140,670
102	0,4	100	13,835	138,350	100	13,833	138,330
103	0,4	100	13,951	139,510	100	13,95	139,500
104	0,4	100	14,093	140,930	100	14,091	140,910
Průměrná hodnota				145,545			145,520
Směrodatná odchylka				6,182			6,176
Rozptyl				14,170			14,150
		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
105	0,5	100	10,15	101,500	100	10,149	101,490
106	0,5	100	10,332	103,320	100	10,333	103,330
107	0,5	100	10,062	100,620	100	10,065	100,650
108	0,5	100	10,119	101,190	100	10,116	101,160
109	0,5	100	10,347	103,470	100	10,341	103,410
110	0,5	100	10,239	102,390	100	10,237	102,370
111	0,5	100	10,17	101,700	100	10,169	101,690
112	0,5	100	10,206	102,060	100	10,206	102,060
Průměrná hodnota				102,031			102,020
Směrodatná odchylka				0,997			0,984
Rozptyl				2,850			2,760



Zapouzďené vzorky



Nepouzďené vzorky

Horizontální meandr 100 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po namáhání vlhkým teplem

		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
113	0,4	50	20,637	412,740	50	20,636	412,720
114	0,4	50	20,919	418,380	50	20,916	418,320
115	0,4	50	21,094	421,880	50	21,087	421,740
116	0,4	50	20,969	419,380	50	20,970	419,400
117	0,4	50	20,356	407,120	50	20,352	407,040
118	0,4	50	20,440	408,800	50	20,439	408,780
119	0,4	50	19,990	399,800	50	19,992	399,840
120	0,4	50	20,345	406,900	50	20,346	406,920
Průměrná hodnota				411,875			411,845
Směrodatná odchylka				7,579			7,545
Rozptyl				22,080			21,900
		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]	I [μ A]	U [V]	R [k Ω]
121	0,5	50	15,849	316,980	50	15,847	316,940
122	0,5	50	15,524	310,480	50	15,523	310,460
123	0,5	50	15,626	312,520	50	15,625	312,500
124	0,5	50	15,480	309,600	50	15,479	309,580
125	0,5	50	16,774	335,480	50	16,773	335,460
126	0,5	50	16,092	321,840	50	16,090	321,800
127	0,5	50	15,986	319,720	50	15,982	319,640
128	0,5	50	15,803	316,060	50	15,799	315,980
Průměrná hodnota				317,835			317,795
Směrodatná odchylka				8,324			8,322
Rozptyl				25,880			25,880



Zapouzdřené vzorky



Nepouzdřené vzorky

**Vertikální meandr 100 Ω/\square + dielektrická vrstva - měření po namáhání
vlhkým teplem**

		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
129	0,4	50	20,604	412,080	50	20,601	412,020
130	0,4	50	20,895	417,900	50	20,893	417,860
131	0,4	50	20,424	408,480	50	20,423	408,460
132	0,4	50	20,33	406,600	50	20,324	406,480
133	0,4	50	20,154	403,080	50	20,15	403,000
134	0,4	50	20,109	402,180	50	20,107	402,140
135	0,4	50	16,184	323,680	50	16,183	323,660
136	0,4	50	14,949	298,980	50	14,95	299,000
Průměrná hodnota				384,123			384,078
Směrodatná odchylka				32,466			32,452
Rozptyl				94,220			94,200
		168 hodin			504 hodin		
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]	I [mA]	U [V]	R [k Ω]
137	0,5	50	15,021	300,420	50	15,019	300,380
138	0,5	50	14,866	297,320	50	14,856	297,120
139	0,5	50	14,631	292,620	50	14,627	292,540
140	0,5	50	14,287	285,740	50	14,286	285,720
141	0,5	50	15,034	300,680	50	15,031	300,620
142	0,5	50	14,659	293,180	50	14,655	293,100
143	0,5	50	14,996	299,920	50	14,995	299,900
144	0,5	50	14,02	280,400	50	14,019	280,380
Průměrná hodnota				293,785			293,720
Směrodatná odchylka				5,516			5,509
Rozptyl				14,940			14,900



Zapouzdřené vzorky



Nepouzduřené vzorky

Hmotnostní zisk zapouzdřených vzorků

číslo vzorku	Výchozí hmotnost [g]	168 h [g]	zisk [g]	zisk [%]	504 h [g]	zisk [g]	zisk [%]
1	2,352	2,356	0,004	0,170	2,357	0,005	0,212
2	2,322	2,326	0,004	0,172	2,325	0,003	0,129
3	2,364	2,369	0,005	0,211	2,369	0,005	0,211
4	2,557	2,558	0,001	0,064	2,558	0,001	0,064
5	2,119	2,120	0,001	0,047	2,120	0,001	0,047
10	2,615	2,616	0,001	0,062	2,618	0,003	0,185
11	2,352	2,355	0,003	0,162	2,355	0,003	0,162
13	2,550	2,551	0,001	0,064	2,551	0,001	0,064
14	2,579	2,582	0,003	0,190	2,582	0,003	0,190
15	2,370	2,372	0,002	0,107	2,373	0,003	0,160
16	2,330	2,332	0,002	0,109	2,332	0,002	0,109
17	2,094	2,097	0,003	0,143	2,098	0,004	0,191
18	2,720	2,725	0,005	0,290	2,725	0,005	0,290
25	2,337	2,339	0,002	0,109	2,339	0,002	0,109
27	2,045	2,047	0,002	0,098	2,047	0,002	0,098
28	2,002	2,004	0,002	0,100	2,005	0,003	0,150
29	2,129	2,134	0,005	0,234	2,134	0,005	0,234
30	2,072	2,075	0,003	0,145	2,076	0,004	0,193
37	2,285	2,287	0,002	0,087	2,287	0,002	0,087
38	2,548	2,551	0,003	0,118	2,552	0,004	0,157
39	2,376	2,379	0,003	0,126	2,379	0,003	0,126
40	2,351	2,355	0,004	0,170	2,354	0,003	0,127
45	2,024	2,027	0,003	0,148	2,028	0,004	0,197
46	2,275	2,278	0,003	0,132	2,279	0,004	0,176
49	2,386	2,392	0,006	0,317	2,393	0,007	0,370
50	2,345	2,347	0,002	0,085	2,348	0,003	0,128
51	2,554	2,558	0,004	0,156	2,559	0,005	0,195
55	1,992	1,996	0,004	0,200	1,996	0,004	0,200
56	2,388	2,390	0,002	0,106	2,391	0,003	0,159
60	2,126	2,130	0,004	0,188	2,131	0,005	0,235
61	2,201	2,204	0,003	0,136	2,204	0,003	0,136
62	2,217	2,222	0,005	0,225	2,224	0,007	0,315
63	2,465	2,468	0,003	0,122	2,468	0,003	0,122
64	2,387	2,389	0,002	0,084	2,389	0,002	0,084
65	2,700	2,703	0,003	0,111	2,704	0,004	0,148
66	2,179	2,182	0,003	0,137	2,182	0,003	0,137
67	2,275	2,278	0,003	0,132	2,278	0,003	0,132

číslo vzorku	Výchozí hmotnost [g]	168 h [g]	zisk [g]	zisk [%]	504 h [g]	zisk [g]	zisk [%]
68	2,262	2,264	0,002	0,088	2,265	0,003	0,132
69	2,276	2,278	0,002	0,088	2,279	0,003	0,132
73	2,565	2,568	0,003	0,117	2,569	0,004	0,156
74	2,351	2,356	0,005	0,212	2,356	0,005	0,212
75	3,047	3,051	0,004	0,131	3,052	0,005	0,164
76	2,377	2,380	0,003	0,126	2,382	0,005	0,210
77	2,249	2,253	0,004	0,178	2,254	0,005	0,222
84	1,865	1,867	0,002	0,107	1,867	0,002	0,107
85	1,870	1,875	0,005	0,267	1,875	0,005	0,267
86	2,183	2,185	0,002	0,092	2,185	0,002	0,092
87	2,094	2,097	0,003	0,143	2,098	0,004	0,191
88	2,332	2,336	0,004	0,171	2,337	0,005	0,214
89	2,481	2,489	0,008	0,321	2,489	0,008	0,321
90	2,307	2,310	0,003	0,130	2,309	0,002	0,087
91	2,263	2,269	0,006	0,264	2,269	0,006	0,264
92	2,262	2,267	0,005	0,221	2,267	0,005	0,221
93	2,297	2,300	0,003	0,130	2,301	0,004	0,174
97	2,420	2,425	0,005	0,206	2,424	0,004	0,165
99	2,414	2,416	0,002	0,083	2,416	0,002	0,083
100	2,465	2,468	0,003	0,122	2,469	0,004	0,162
101	2,739	2,745	0,006	0,219	2,744	0,005	0,182
102	2,560	2,562	0,002	0,078	2,563	0,003	0,117
105	2,201	2,206	0,005	0,227	2,206	0,005	0,227
106	2,484	2,486	0,002	0,080	2,488	0,004	0,161
107	2,746	2,752	0,006	0,218	2,752	0,006	0,218
108	2,532	2,536	0,004	0,158	2,536	0,004	0,158
109	2,304	2,308	0,004	0,173	2,307	0,003	0,130
113	1,843	1,848	0,005	0,271	1,849	0,006	0,324
114	1,982	1,986	0,004	0,201	1,986	0,004	0,201
115	2,092	2,096	0,004	0,191	2,096	0,004	0,191
117	2,032	2,035	0,003	0,147	2,036	0,004	0,196
118	2,093	2,101	0,008	0,381	2,100	0,007	0,333
121	2,316	2,319	0,003	0,129	2,320	0,004	0,172
124	2,250	2,251	0,001	0,044	2,251	0,001	0,044
126	2,344	2,346	0,002	0,085	2,346	0,002	0,085
127	1,936	1,937	0,001	0,052	1,938	0,002	0,103
128	2,412	2,415	0,003	0,124	2,415	0,003	0,124
129	2,151	2,153	0,002	0,093	2,153	0,002	0,093

číslo vzorku	Výchozí hmotnost [g]	168 h [g]	zisk [g]	zisk [%]	504 h [g]	zisk [g]	zisk [%]
130	2,282	2,284	0,002	0,088	2,285	0,003	0,131
132	2,061	2,062	0,001	0,048	2,063	0,002	0,097
133	2,333	2,335	0,002	0,086	2,336	0,003	0,128
134	2,375	2,378	0,003	0,126	2,379	0,004	0,168
137	2,393	2,394	0,001	0,042	2,394	0,001	0,042
138	2,198	2,199	0,001	0,045	2,200	0,002	0,091
139	2,293	2,295	0,002	0,087	2,296	0,003	0,131
141	2,378	2,381	0,003	0,126	2,382	0,004	0,168
142	2,239	2,241	0,002	0,089	2,241	0,002	0,089

Hmotnostní zisk nezapouzdřených vzorků

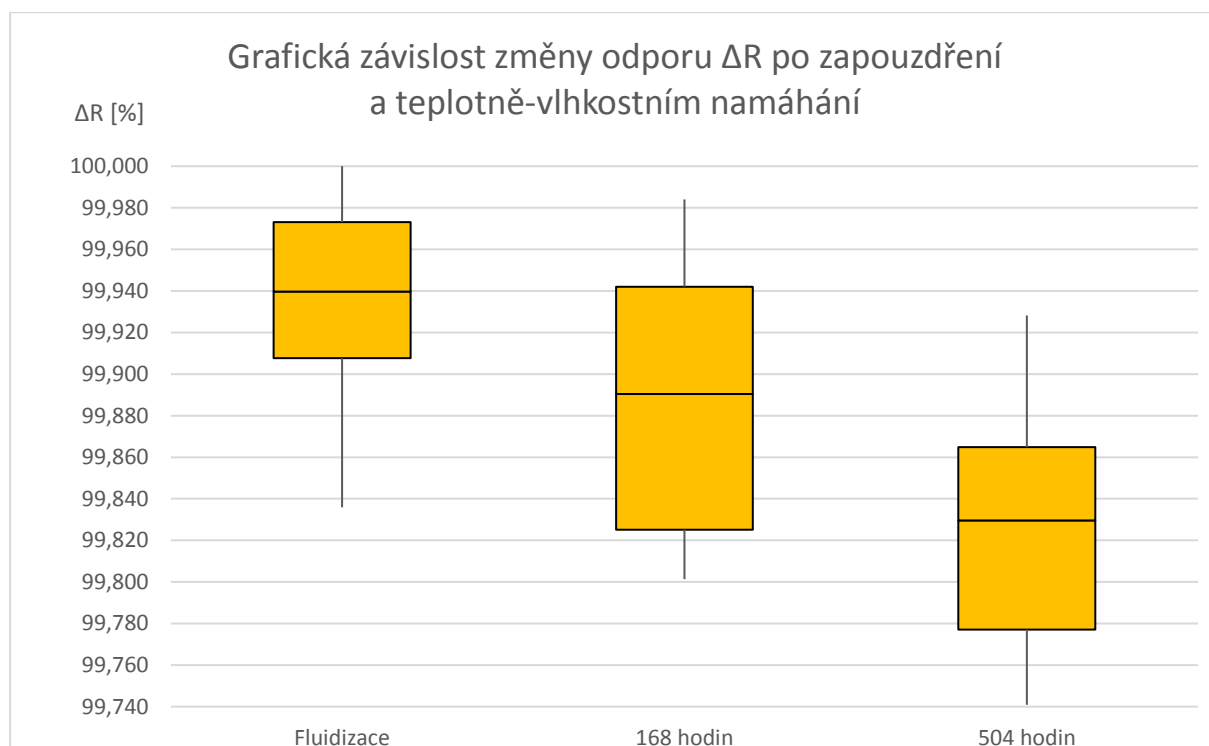
Číslo vzorku	Výchozí hmotnost [g]	168 h [g]	Zisk [g]	Zisk [%]	504 h [g]	Zisk [g]	Zisk [%]
6	0,917	0,917	0,000	0,000	0,917	0,000	0,000
7	0,945	0,946	0,001	0,106	0,945	0,000	0,000
8	0,955	0,956	0,001	0,105	0,956	0,001	0,105
9	0,907	0,907	0,000	0,000	0,907	0,000	0,000
19	0,918	0,918	0,000	0,000	0,919	0,001	0,109
20	0,924	0,924	0,000	0,000	0,925	0,001	0,108
21	0,927	0,927	0,000	0,000	0,927	0,000	0,000
22	0,93	0,93	0,000	0,000	0,931	0,001	0,107
23	0,92	0,92	0,000	0,000	0,921	0,001	0,109
24	0,926	0,926	0,000	0,000	0,927	0,001	0,108
26	0,907	0,907	0,000	0,000	0,909	0,002	0,220
31	0,912	0,913	0,001	0,110	0,912	0,000	0,000
32	0,962	0,963	0,001	0,104	0,963	0,001	0,104
41	0,913	0,914	0,001	0,109	0,914	0,001	0,109
42	0,868	0,869	0,001	0,115	0,868	0,000	0,000
44	0,967	0,968	0,001	0,103	0,968	0,001	0,103
48	0,917	0,918	0,001	0,109	0,918	0,001	0,109
52	0,954	0,954	0,000	0,000	0,953	-0,001	-0,105
53	0,917	0,918	0,001	0,109	0,917	0,000	0,000
54	0,921	0,922	0,001	0,108	0,922	0,001	0,108
57	0,921	0,921	0,000	0,000	0,922	0,001	0,108
58	0,933	0,934	0,001	0,107	0,934	0,001	0,107
59	0,923	0,924	0,001	0,108	0,923	0,000	0,000
70	0,927	0,927	0,000	0,000	0,928	0,001	0,108
71	0,922	0,922	0,000	0,000	0,922	0,000	0,000
72	0,924	0,924	0,000	0,000	0,925	0,001	0,108
78	0,973	0,973	0,000	0,000	0,973	0,000	0,000
79	0,935	0,936	0,001	0,107	0,936	0,001	0,107
80	0,938	0,938	0,000	0,000	0,938	0,000	0,000
81	0,825	0,826	0,001	0,121	0,826	0,001	0,121
82	0,841	0,841	0,000	0,000	0,841	0,000	0,000
83	0,813	0,814	0,001	0,123	0,814	0,001	0,123
94	0,824	0,823	-0,001	-0,122	0,824	0,000	0,000
95	0,828	0,828	0,000	0,000	0,828	0,000	0,000
96	0,857	0,858	0,001	0,117	0,858	0,001	0,117
98	0,836	0,836	0,000	0,000	0,836	0,000	0,000
103	0,821	0,822	0,001	0,122	0,821	0,000	0,000

Číslo vzorku	Výchozí hmotnost [g]	168 h [g]	Zisk [g]	Zisk [%]	504 h [g]	Zisk [g]	Zisk [%]
104	0,826	0,826	0,000	0,000	0,828	0,002	0,242
110	0,823	0,823	0,000	0,000	0,823	0,000	0,000
111	0,845	0,846	0,001	0,118	0,846	0,001	0,118
112	0,854	0,855	0,001	0,117	0,855	0,001	0,117
116	0,840	0,841	0,001	0,119	0,841	0,001	0,119
119	0,823	0,823	0,000	0,000	0,824	0,001	0,121
120	0,820	0,821	0,001	0,122	0,822	0,002	0,243
122	0,848	0,849	0,001	0,118	0,849	0,001	0,118
123	0,819	0,819	0,000	0,000	0,820	0,001	0,122
125	0,843	0,843	0,000	0,000	0,843	0,000	0,000
131	0,855	0,855	0,000	0,000	0,855	0,000	0,000
135	0,841	0,841	0,000	0,000	0,841	0,000	0,000
136	0,840	0,841	0,001	0,119	0,840	0,000	0,000
140	0,856	0,856	0,000	0,000	0,856	0,000	0,000
143	0,869	0,870	0,001	0,115	0,870	0,001	0,115
144	0,836	0,836	0,000	0,000	0,837	0,001	0,119

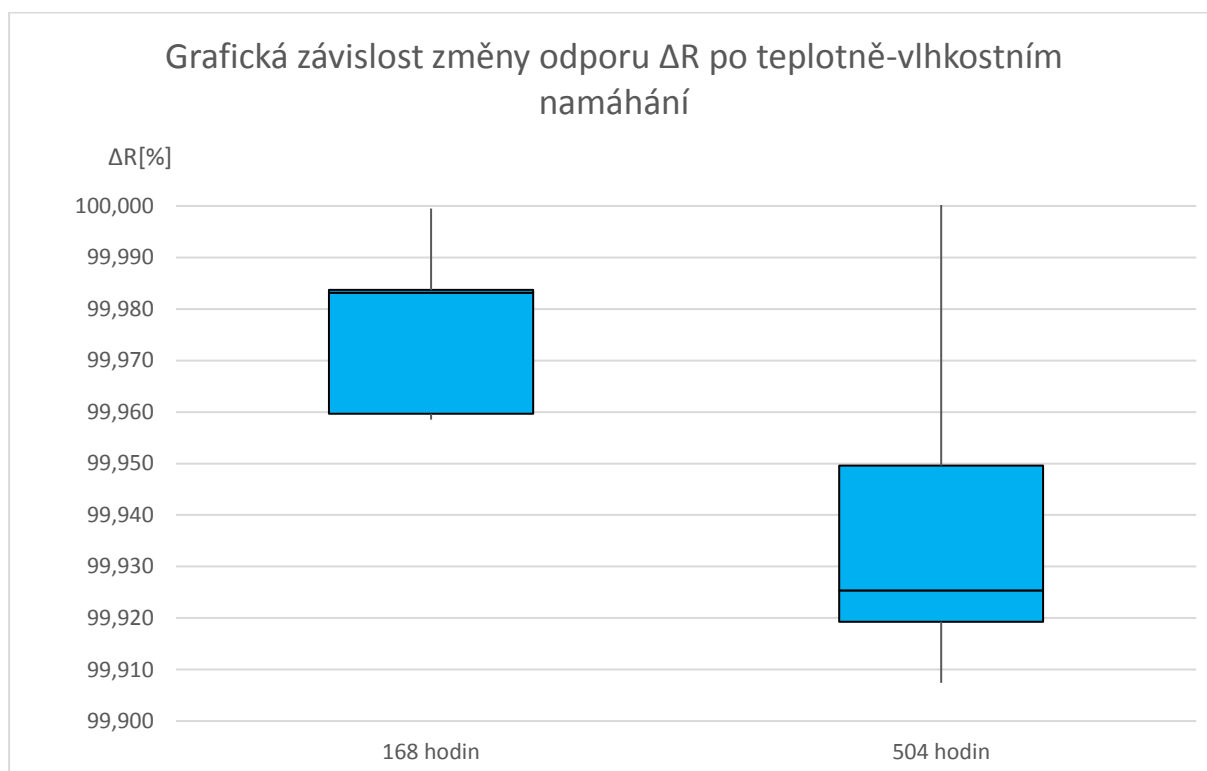
Příloha 4: Grafické výstupy naměřených hodnot

Horizontální meandr 10 Ω/\square tloušťka 0,4 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
1	0,4	100,000	100,000	99,894	99,837
2	0,4	100,000	99,907	99,805	99,762
3	0,4	100,000	99,836	99,801	99,741
4	0,4	100,000	99,968	99,984	99,928
5	0,4	100,000	99,911	99,887	99,822
10	0,4	100,000	99,975	99,958	99,874
Minimální hodnota		100,000	99,836	99,801	99,741
První kvartil Q_{25}		100,000	99,908	99,825	99,777
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,940	99,888	99,827
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,973	99,942	99,865
Maximální hodnota		100,000	100,000	99,984	99,928

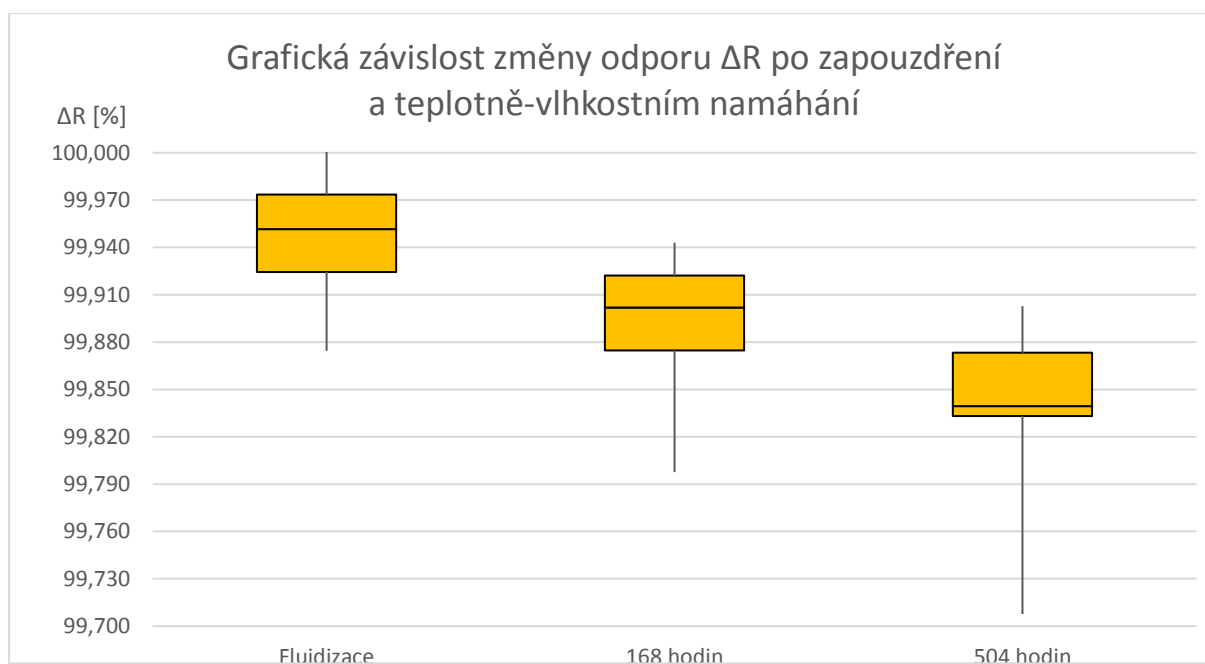


Nepouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
6	0,4	100,000	99,992	99,950
7	0,4	100,000	99,984	99,976
8	0,4	100,000	99,960	99,919
9	0,4	100,000	99,959	99,925
11	0,4	100,000	99,983	99,907
Minimální hodnota		100,000	99,959	99,907
První kvartil Q1		100,000	99,960	99,919
Druhý kvartil Q2		100,000	99,983	99,925
Třetí kvartil Q3		100,000	99,984	99,950
Maximální hodnota		100,000	99,992	99,976

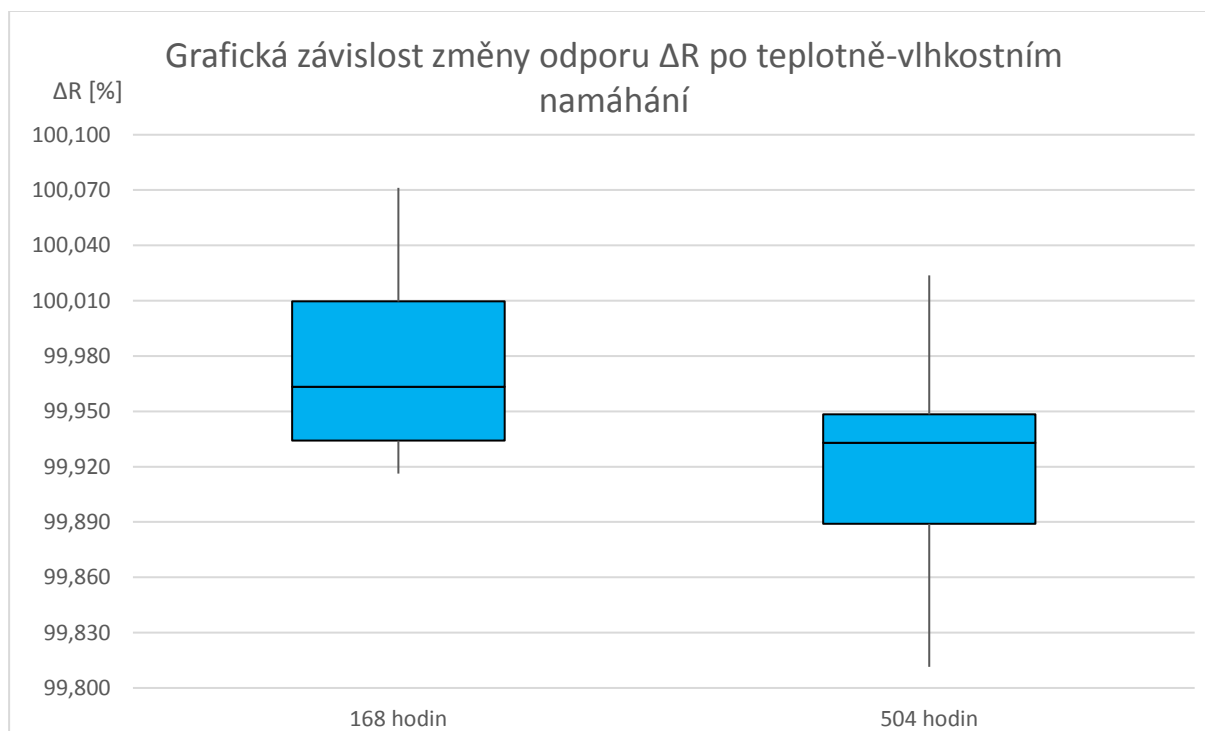


Horizontální meandr 10 Ω/\square tloušťka 0,5 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
13	0,5	8,226	99,964	99,927	99,903
14	0,5	8,633	99,977	99,907	99,884
15	0,5	8,677	99,919	99,896	99,839
16	0,5	8,764	99,874	99,943	99,840
17	0,5	8,893	100,011	99,798	99,708
18	0,5	8,303	99,940	99,868	99,831
Minimální hodnota		100,000	99,874	99,798	99,708
První kvartil Q1		100,000	99,924	99,875	99,833
Druhý kvartil Q2		100,000	99,952	99,902	99,839
Třetí kvartil Q3		100,000	99,974	99,922	99,873
Maximální hodnota		100,000	100,011	99,943	99,903

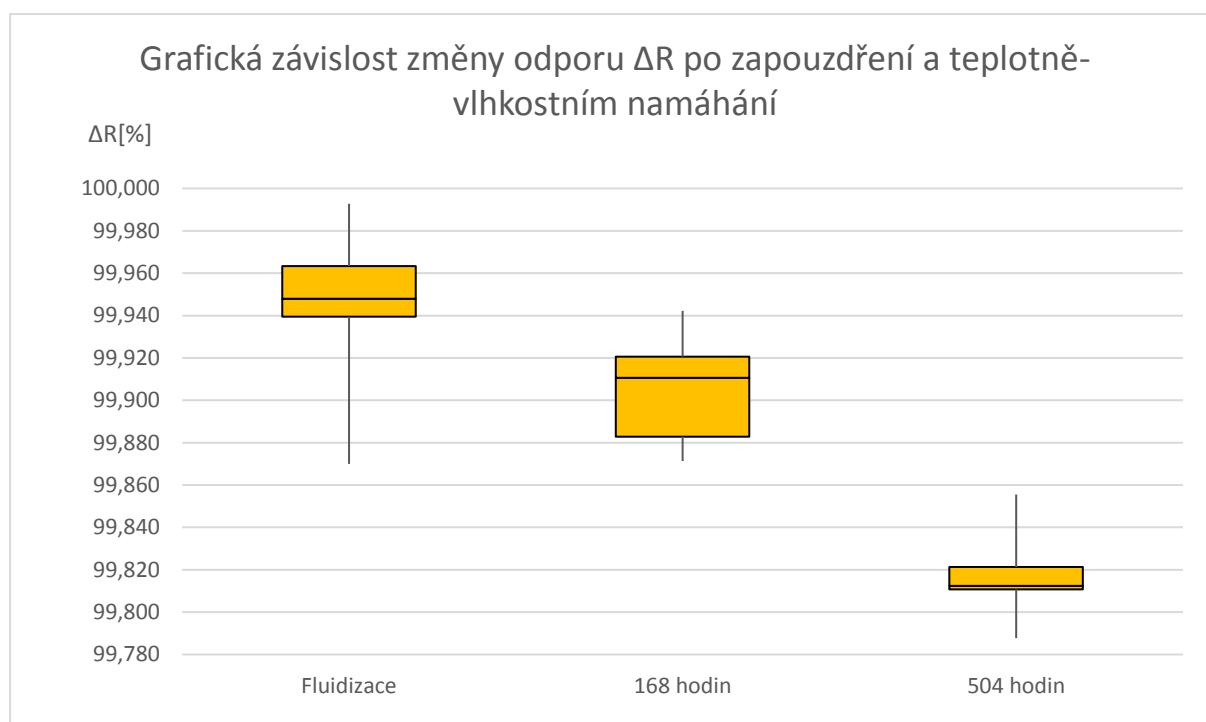


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
19	0,5	100,000	99,916	99,928
20	0,5	100,000	99,925	99,811
21	0,5	100,000	100,071	100,024
22	0,5	100,000	99,964	99,952
23	0,5	100,000	100,025	99,876
24	0,5	100,000	99,963	99,938
Minimální hodnota		100,000	99,916	99,811
První kvartil Q1		100,000	99,934	99,889
Druhý kvartil Q2		100,000	99,963	99,933
Třetí kvartil Q3		100,000	100,010	99,948
Maximální hodnota		100,000	100,071	100,024

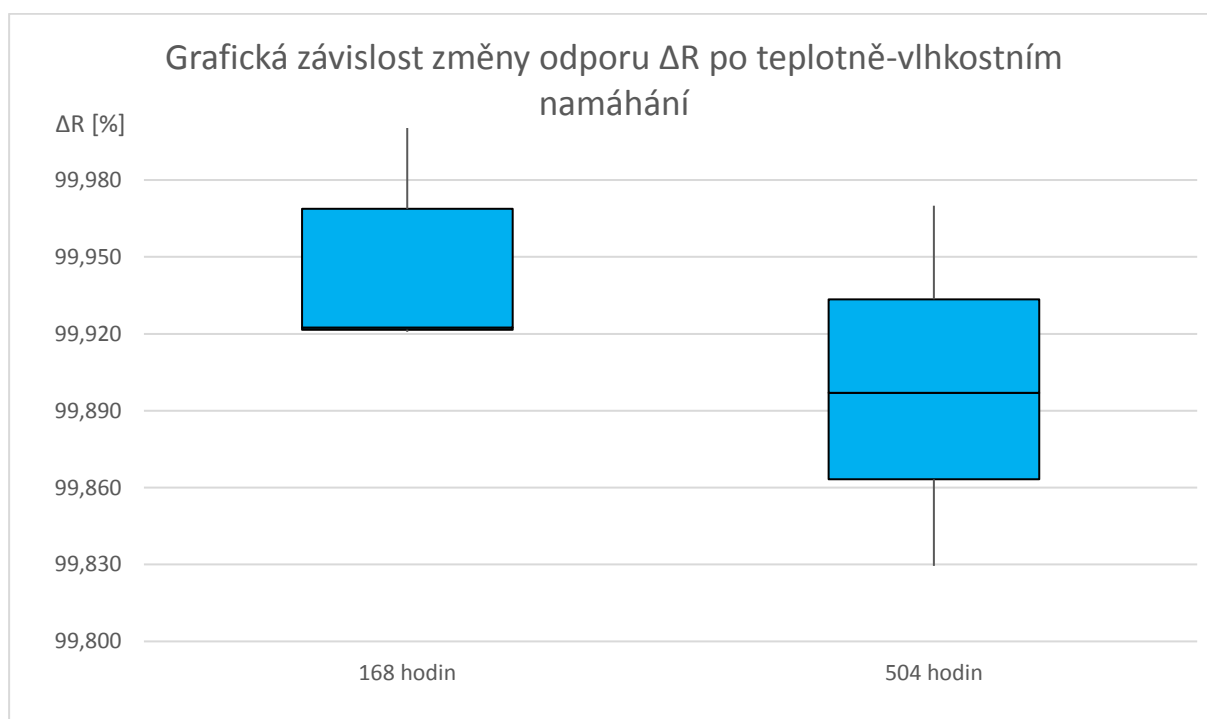


Vertikální meandr 10 Ω/□ tloušťka 0,4 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
25	0,4	100,000	99,948	99,911	99,821
27	0,4	100,000	99,870	99,942	99,856
28	0,4	100,000	99,963	99,883	99,788
29	0,4	100,000	99,993	99,921	99,812
30	0,4	100,000	99,939	99,871	99,811
Minimální hodnota		100,000	99,870	99,871	99,788
První kvartil Q ₂₅		100,000	99,939	99,883	99,811
Druhý kvartil Q ₅₀		100,000	99,948	99,911	99,812
Třetí kvartil Q ₇₅		100,000	99,963	99,921	99,821
Maximální hodnota		100,000	99,993	99,942	99,856

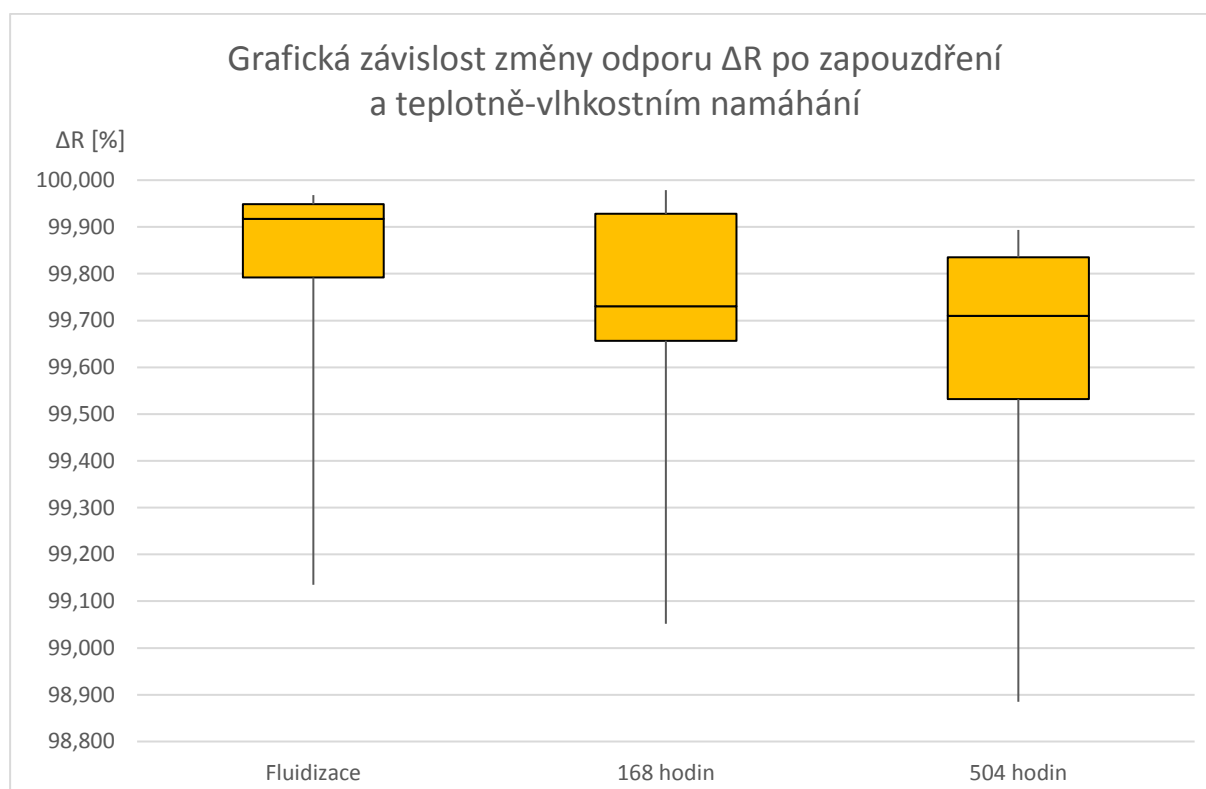


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
26	0,4	100,000	99,921	99,897
31	0,4	100,000	99,922	99,829
32	0,4	100,000	100,015	99,970
Minimální hodnota		100,000	99,921	99,829
První kvartil Q ₂₅		100,000	99,922	99,863
Druhý kvartil Q ₅₀		100,000	99,922	99,897
Třetí kvartil Q ₇₅		100,000	99,969	99,933
Maximální hodnota		100,000	100,015	99,970

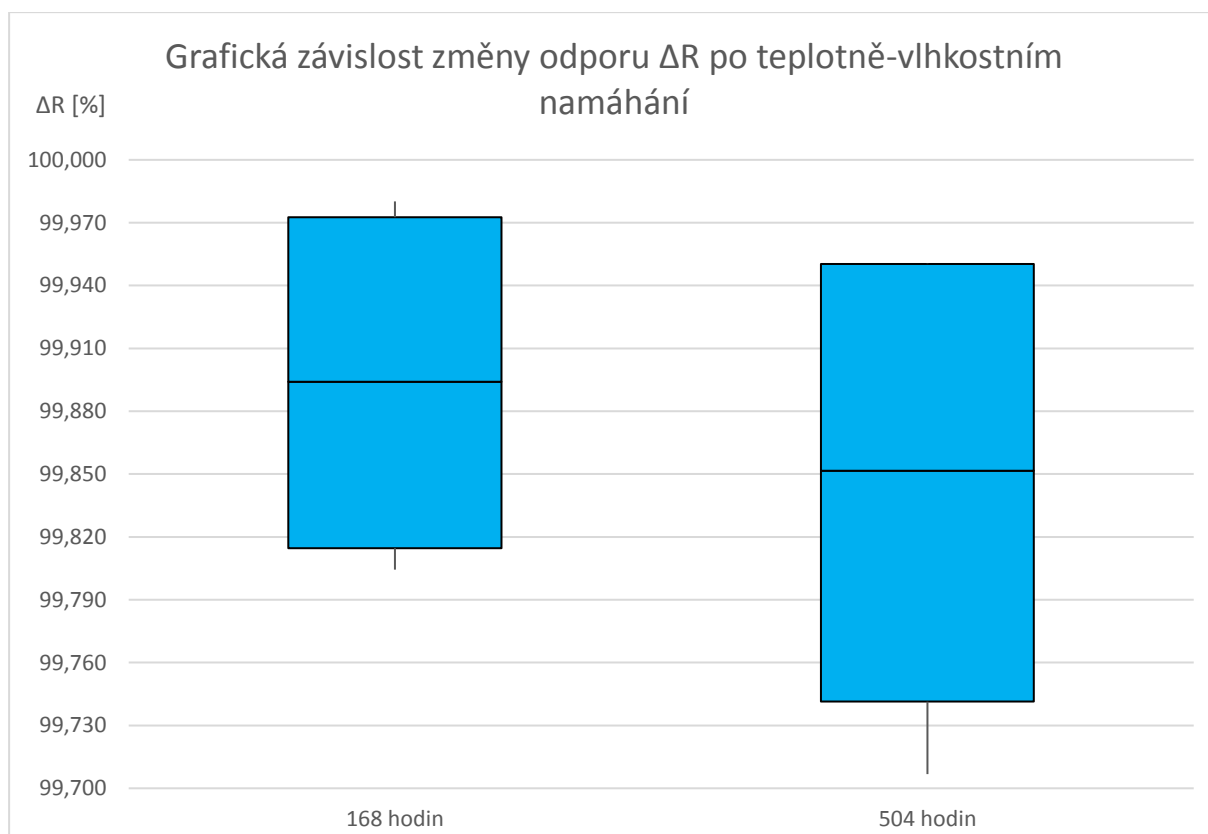


Vertikální meandr 10 Ω/\square tloušťka 0,5 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
37	0,5	100,000	99,968	99,979	99,894
38	0,5	100,000	99,917	99,731	99,710
40	0,5	100,000	99,948	99,928	99,835
45	0,5	100,000	99,792	99,657	99,532
46	0,5	100,000	99,135	99,052	98,885
Minimální hodnota		100,000	99,135	99,052	98,885
První kvartil Q₂₅		100,000	99,792	99,657	99,532
Druhý kvartil Q₅₀		100,000	99,917	99,731	99,710
Třetí kvartil Q₇₅		100,000	99,948	99,928	99,835
Maximální hodnota		100,000	99,968	99,979	99,894

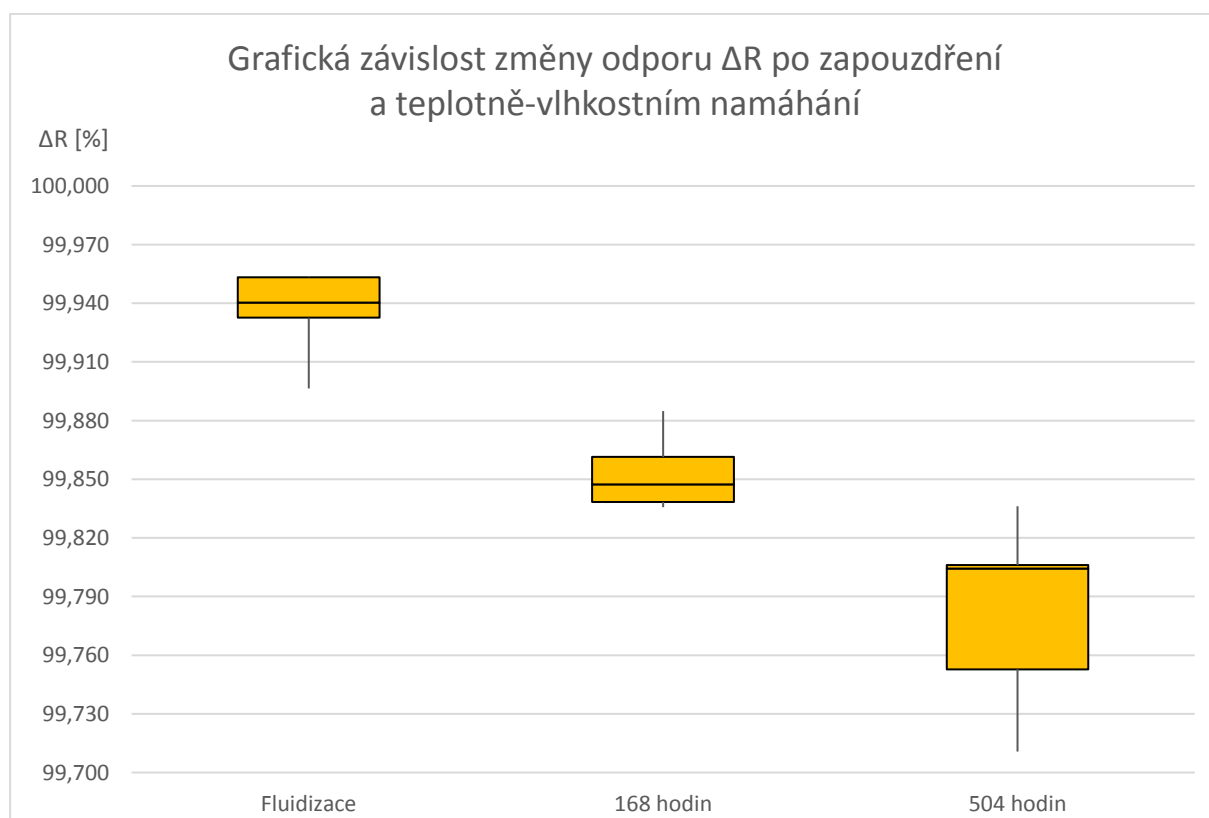


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
41	0,5	100,000	99,970	99,950
42	0,5	100,000	99,818	99,707
44	0,5	100,000	99,804	99,753
48	0,5	100,000	99,980	99,950
Minimální hodnota		100,000	99,804	99,707
První kvartil Q ₂₅		100,000	99,815	99,741
Druhý kvartil Q ₅₀		100,000	99,894	99,852
Třetí kvartil Q ₇₅		100,000	99,973	99,950
Maximální hodnota		100,000	99,980	99,950

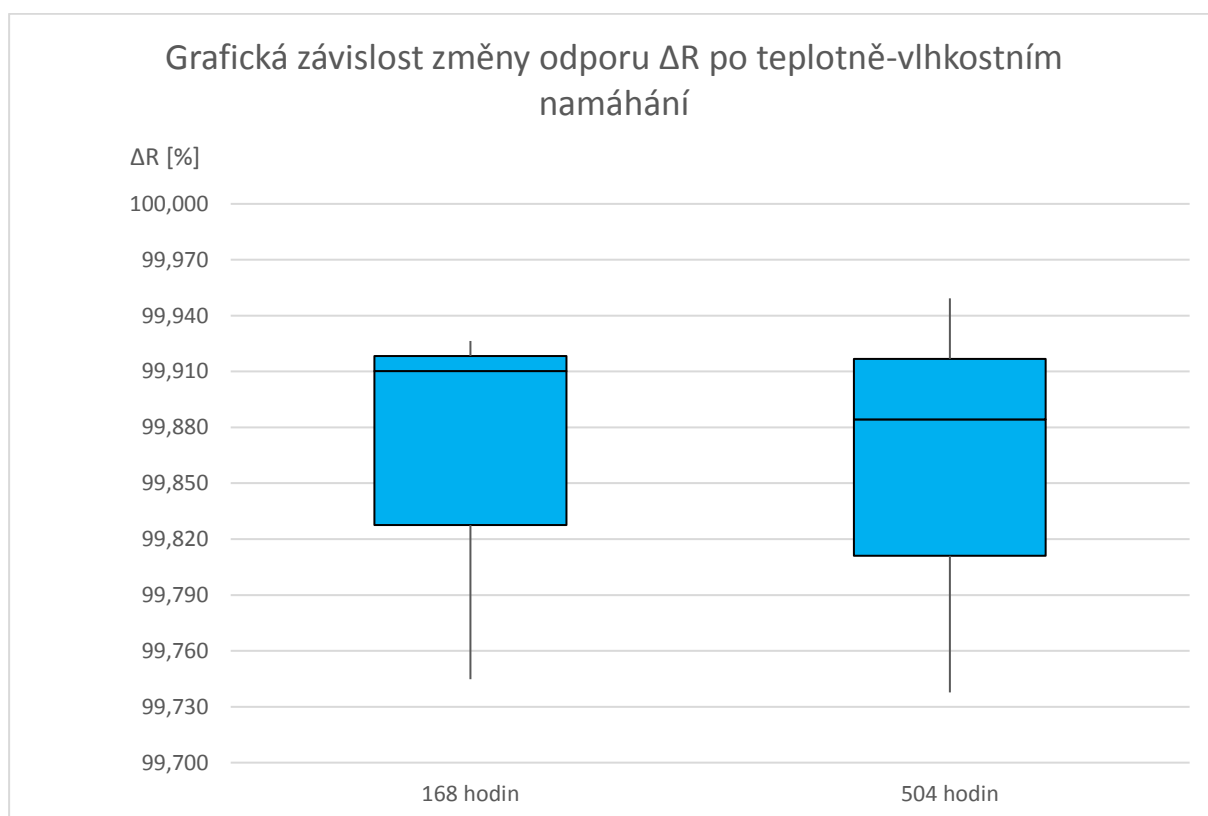


Vertikální meandr 10 Ω/\square + dielektrická vrstva - tloušťka 0,4 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
49	0,4	100,000	99,933	99,861	99,753
50	0,4	100,000	99,896	99,836	99,711
51	0,4	100,000	99,953	99,838	99,806
55	0,4	100,000	99,940	99,847	99,836
56	0,4	100,000	99,954	99,885	99,804
Minimální hodnota		100,000	99,896	99,836	99,711
První kvartil Q_{25}		100,000	99,933	99,838	99,753
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,940	99,847	99,804
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,953	99,861	99,806
Maximální hodnota		100,000	99,954	99,885	99,836

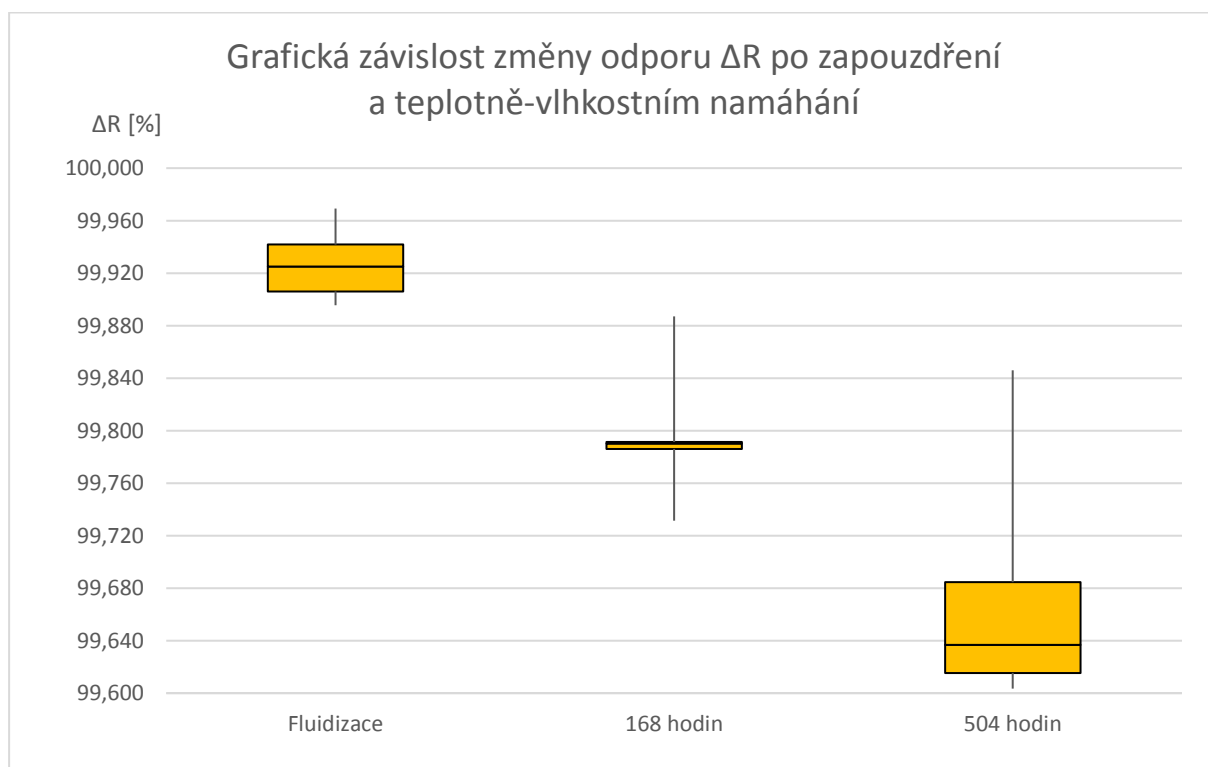


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
52	0,4	100,000	99,926	99,884
53	0,4	100,000	99,745	99,738
54	0,4	100,000	99,910	99,949
Minimální hodnota		100,000	99,745	99,738
První kvartil Q ₂₅		100,000	99,828	99,811
Druhý kvartil Q ₅₀		100,000	99,910	99,884
Třetí kvartil Q ₇₅		100,000	99,918	99,917
Maximální hodnota		100,000	99,926	99,949

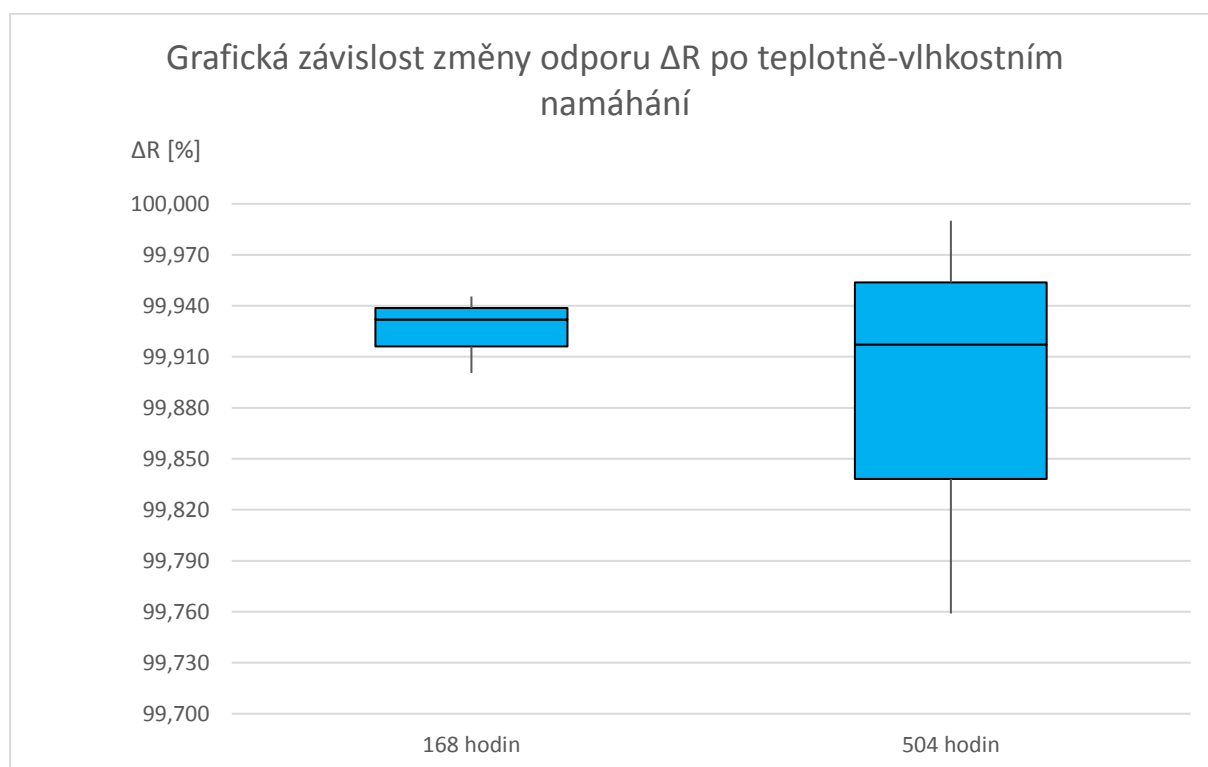


Vertikální meandr 10 Ω/\square + dielektrická vrstva - tloušťka 0,5 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
60	0,5	100,000	99,969	99,887	99,846
61	0,5	100,000	99,906	99,786	99,603
62	0,5	100,000	99,925	99,790	99,615
63	0,5	100,000	99,942	99,791	99,685
64	0,5	100,000	99,896	99,731	99,637
Minimální hodnota		100,000	99,896	99,731	99,603
První kvartil Q ₂₅		100,000	99,906	99,786	99,615
Druhý kvartil Q ₅₀		100,000	99,925	99,790	99,637
Třetí kvartil Q ₇₅		100,000	99,942	99,791	99,685
Maximální hodnota		100,000	99,969	99,887	99,846

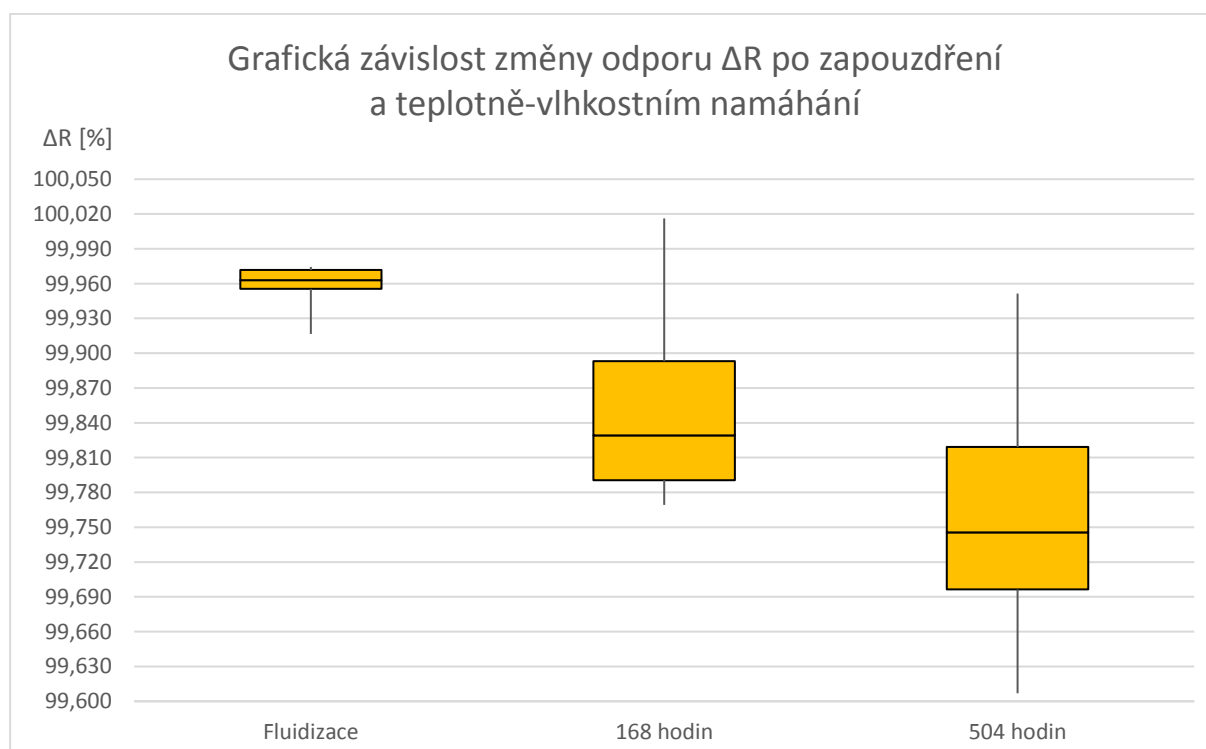


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
57	0,5	100,000	99,946	99,990
58	0,5	100,000	99,900	99,759
59	0,5	100,000	99,932	99,917
Minimální hodnota		100,000	99,900	99,759
První kvartil Q ₂₅		100,000	99,916	99,838
Druhý kvartil Q ₅₀		100,000	99,932	99,917
Třetí kvartil Q ₇₅		100,000	99,939	99,954
Maximální hodnota		100,000	99,946	99,990

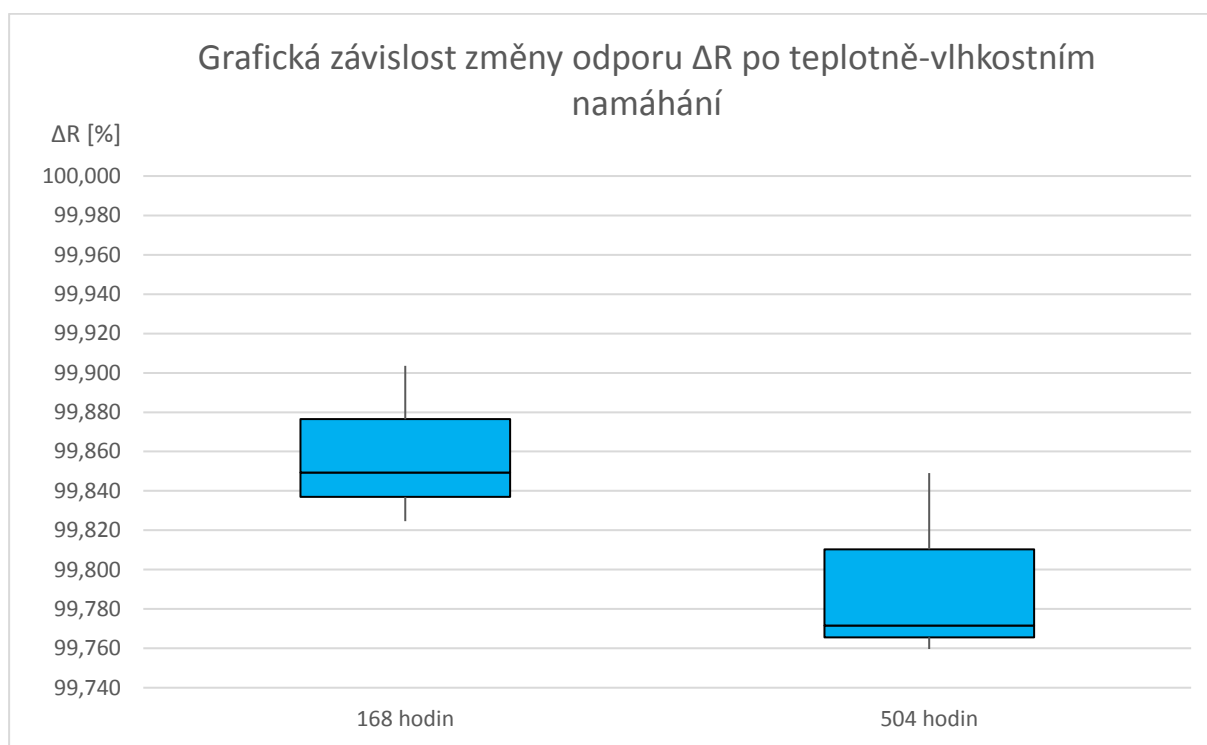


Horizontální meandr 10 Ω/\square + dielektrická vrstva - tloušťka 0,4 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
65	0,4	100,000	99,974	99,791	99,607
66	0,4	100,000	99,963	99,893	99,819
67	0,4	100,000	99,972	100,016	99,951
68	0,4	100,000	99,955	99,769	99,696
69	0,4	100,000	99,917	99,829	99,746
Minimální hodnota		100,000	99,917	99,769	99,607
První kvartil Q_{25}		100,000	99,955	99,791	99,696
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,963	99,829	99,746
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,972	99,893	99,819
Maximální hodnota		100,000	99,974	100,016	99,951

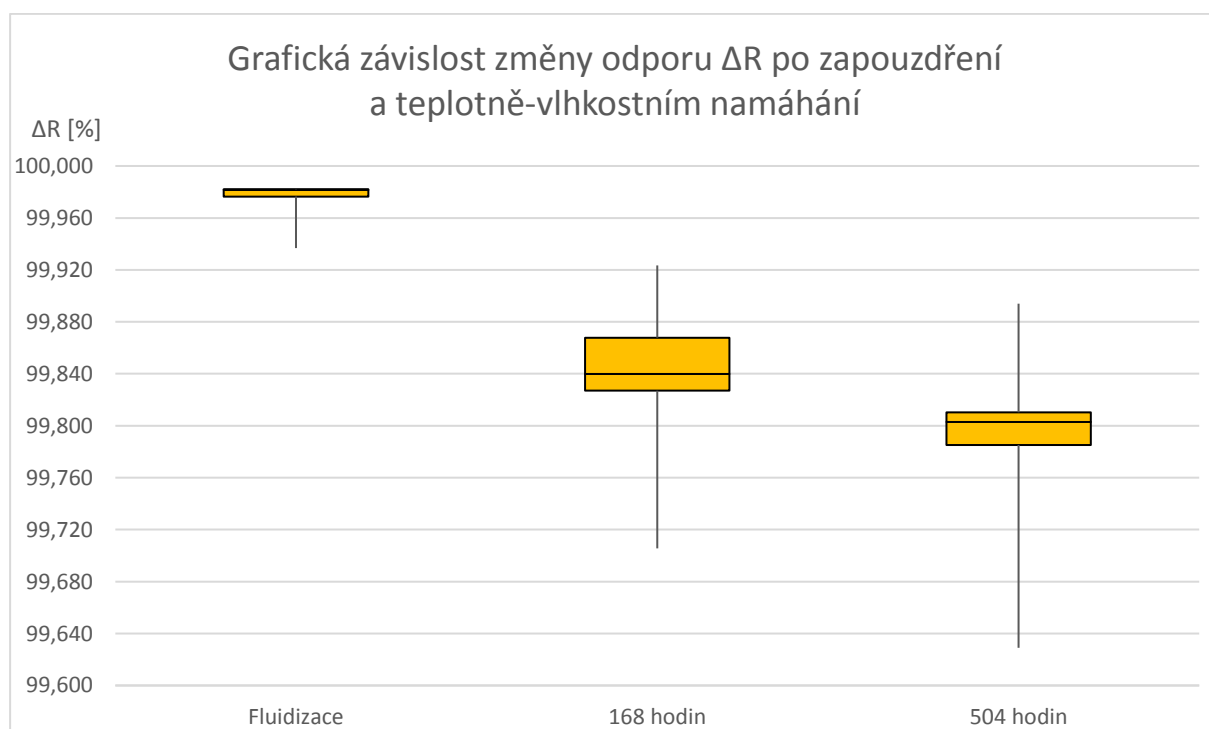


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
70	0,4	100,000	99,904	99,849
71	0,4	100,000	99,849	99,760
72	0,4	100,000	99,825	99,772
Minimální hodnota		100,000	99,825	99,760
První kvartil Q_{25}		100,000	99,837	99,766
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,849	99,772
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,876	99,810
Maximální hodnota		100,000	99,904	99,849

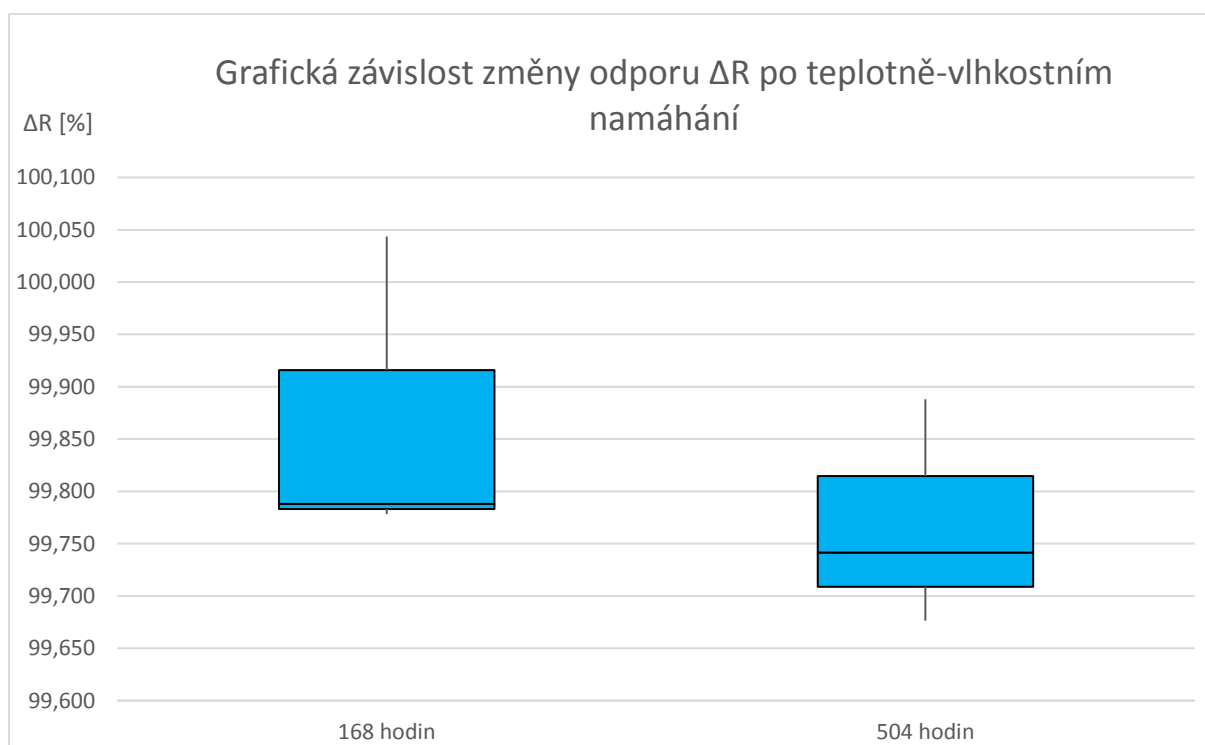


Horizontální meandr 10 Ω/\square + dielektrická vrstva - tloušťka 0,5 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
73	0,5	100,000	99,982	99,827	99,785
74	0,5	100,000	99,976	99,706	99,629
75	0,5	100,000	99,982	99,923	99,894
76	0,5	100,000	99,937	99,868	99,810
77	0,5	100,000	99,982	99,840	99,803
Minimální hodnota		100,000	99,937	99,706	99,629
První kvartil Q_{25}		100,000	99,976	99,827	99,785
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,982	99,840	99,803
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,982	99,868	99,810
Maximální hodnota		100,000	99,982	99,923	99,894

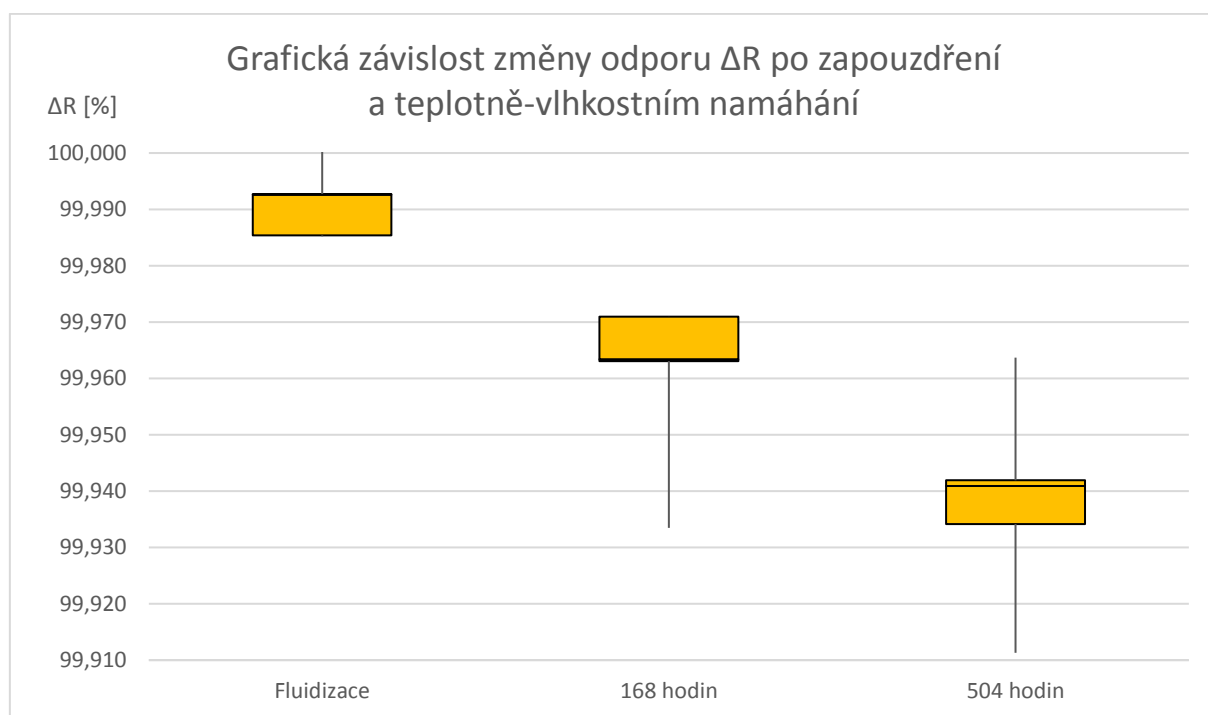


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
78	0,5	100,000	99,788	99,676
79	0,5	100,000	99,778	99,741
80	0,5	100,000	100,044	99,888
Minimální hodnota		100,000	99,778	99,676
První kvartil Q_{25}		100,000	99,783	99,709
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,788	99,741
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,916	99,815
Maximální hodnota		100,000	100,044	99,888

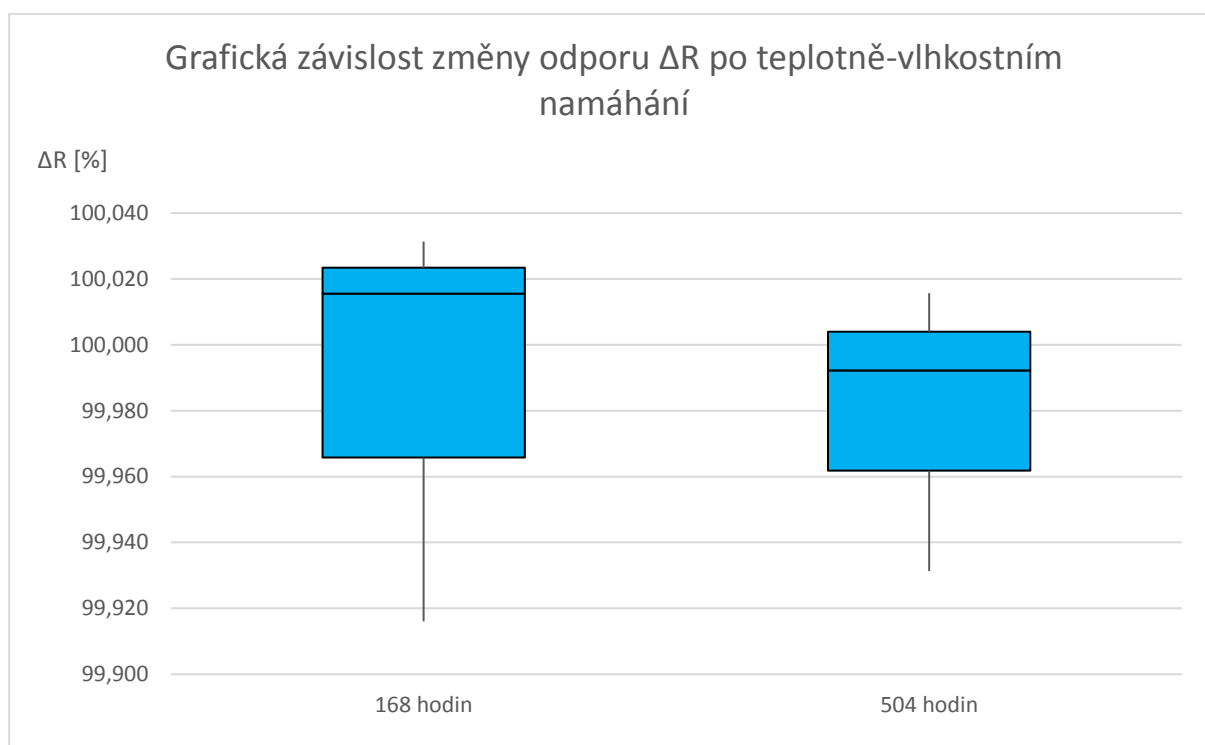


Horizontální meandr 100 Ω/\square tloušťka 0,4 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
84	0,4	100,000	99,985	99,963	99,934
85	0,4	100,000	100,007	99,971	99,942
86	0,4	100,000	99,993	99,963	99,941
87	0,4	100,000	99,993	99,971	99,964
88	0,4	100,000	99,985	99,933	99,911
Minimální hodnota		100,000	99,985	99,933	99,911
První kvartil Q_{25}		100,000	99,985	99,963	99,934
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,993	99,963	99,941
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,993	99,971	99,942
Maximální hodnota		100,000	100,007	99,971	99,964

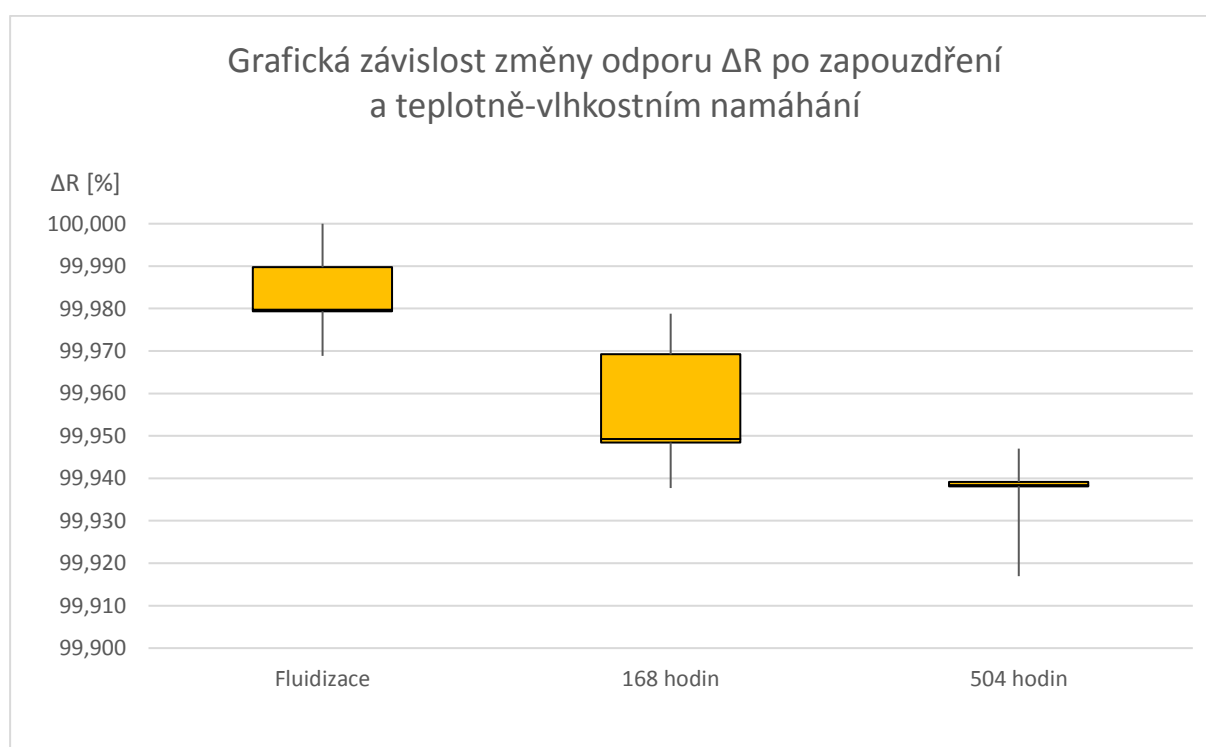


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
81	0,4	100,000	99,916	99,931
82	0,4	100,000	100,031	100,016
83	0,4	100,000	100,016	99,992
Minimální hodnota		100,000	99,916	99,931
První kvartil Q_{25}		100,000	99,966	99,962
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	100,016	99,992
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	100,023	100,004
Maximální hodnota		100,000	100,031	100,016

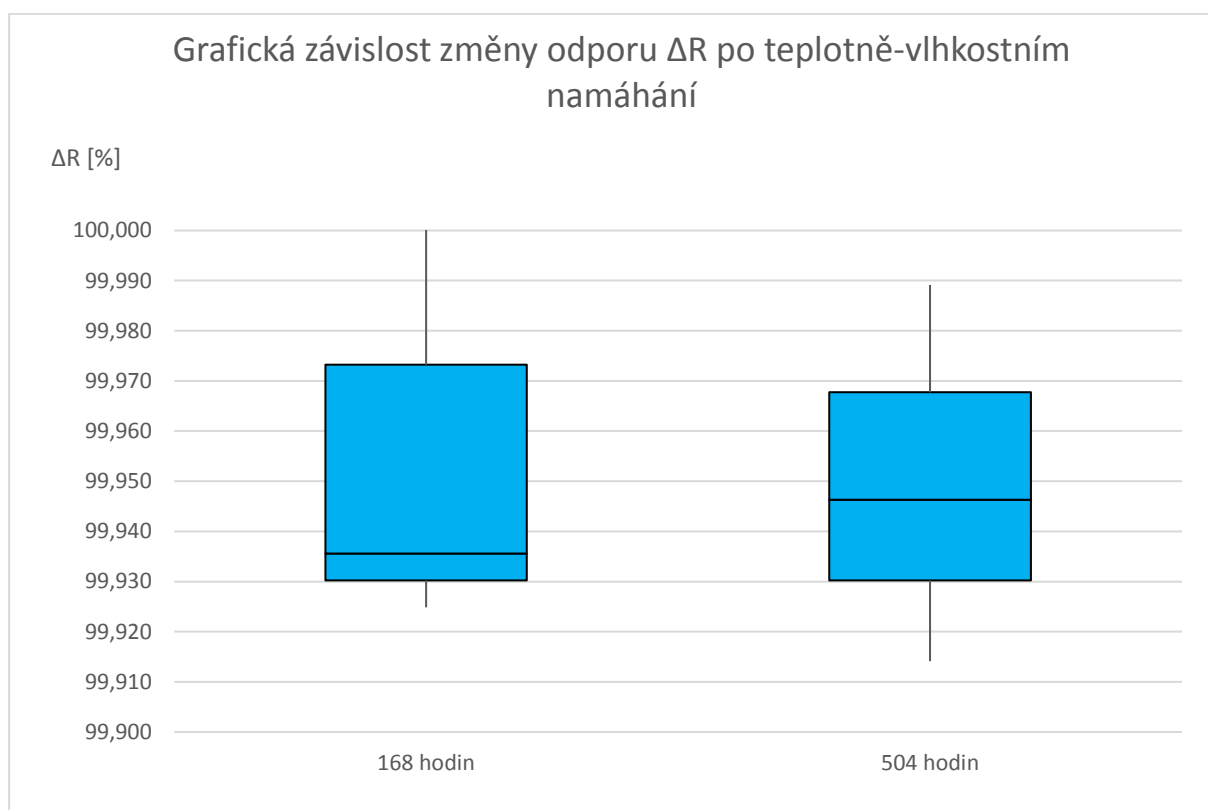


Horizontální meandr 100 Ω/\square tloušťka 0,5 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
89	0,5	100,000	99,990	99,969	99,938
90	0,5	100,000	99,979	99,948	99,938
91	0,5	100,000	99,969	99,938	99,917
92	0,5	100,000	99,980	99,949	99,939
93	0,5	100,000	100,000	99,979	99,947
Minimální hodnota		100,000	99,969	99,938	99,917
První kvartil Q_{25}		100,000	99,979	99,948	99,938
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,980	99,949	99,938
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,990	99,969	99,939
Maximální hodnota		100,000	100,000	99,979	99,947

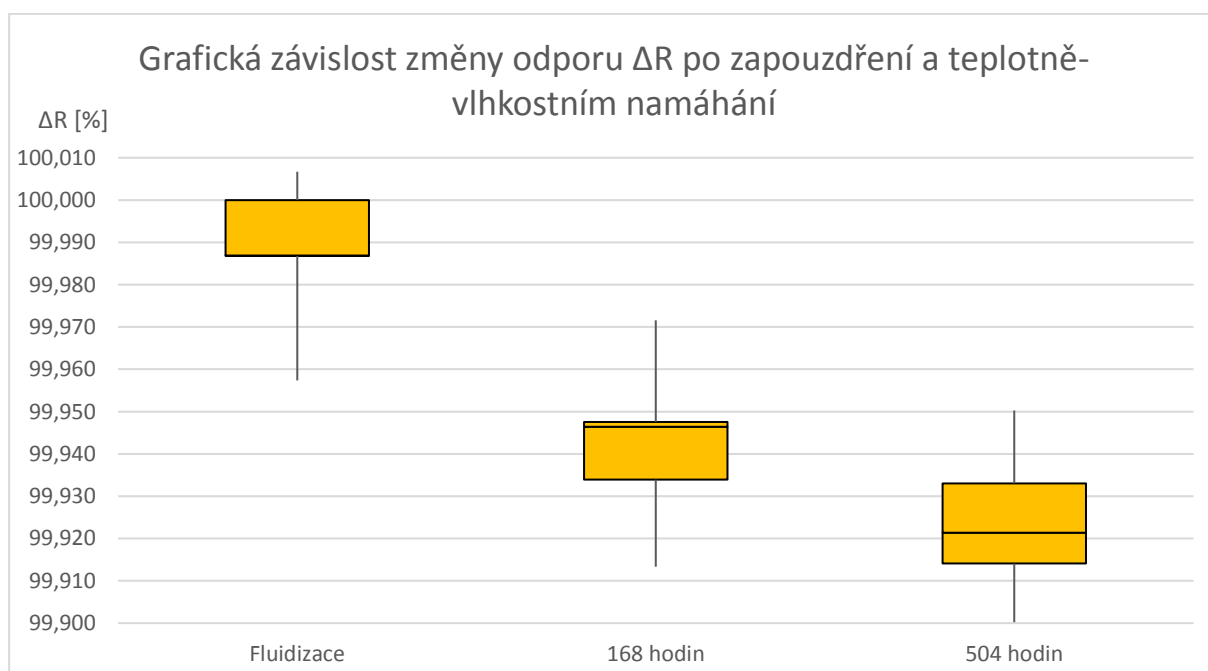


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
78	0,5	100,000	99,925	99,914
79	0,5	100,000	100,011	99,989
80	0,5	100,000	99,936	99,946
Minimální hodnota		100,000	99,925	99,914
První kvartil Q_{25}		100,000	99,930	99,930
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,936	99,946
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,973	99,968
Maximální hodnota		100,000	100,011	99,989

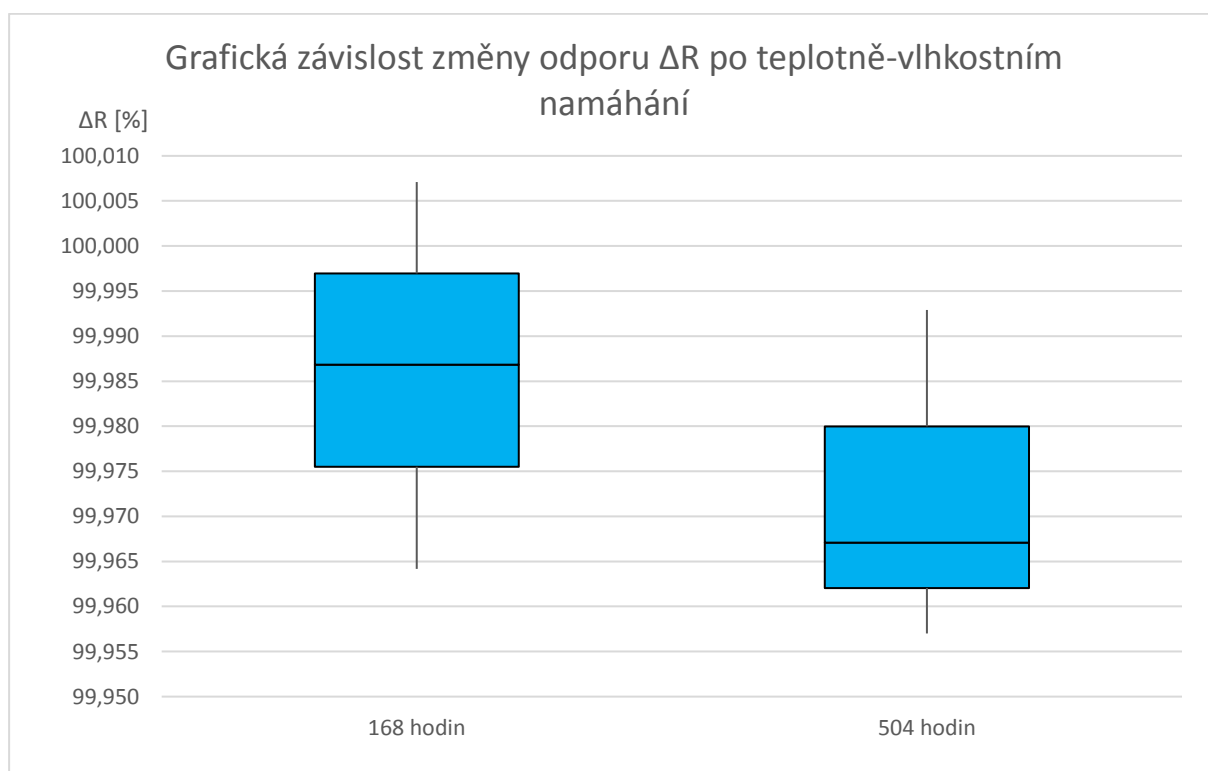


Vertikální meandr 100 Ω/\square tloušťka 0,4 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
97	0,4	100,000	99,987	99,934	99,914
99	0,4	100,000	99,987	99,948	99,921
100	0,4	100,000	100,007	99,946	99,933
101	0,4	100,000	99,957	99,972	99,950
102	0,4	100,000	100,000	99,913	99,899
Minimální hodnota		100,000	99,957	99,913	99,899
První kvartil Q ₂₅		100,000	99,987	99,934	99,914
Druhý kvartil Q ₅₀		100,000	99,987	99,946	99,921
Třetí kvartil Q ₇₅		100,000	100,000	99,948	99,933
Maximální hodnota		100,000	100,007	99,972	99,950

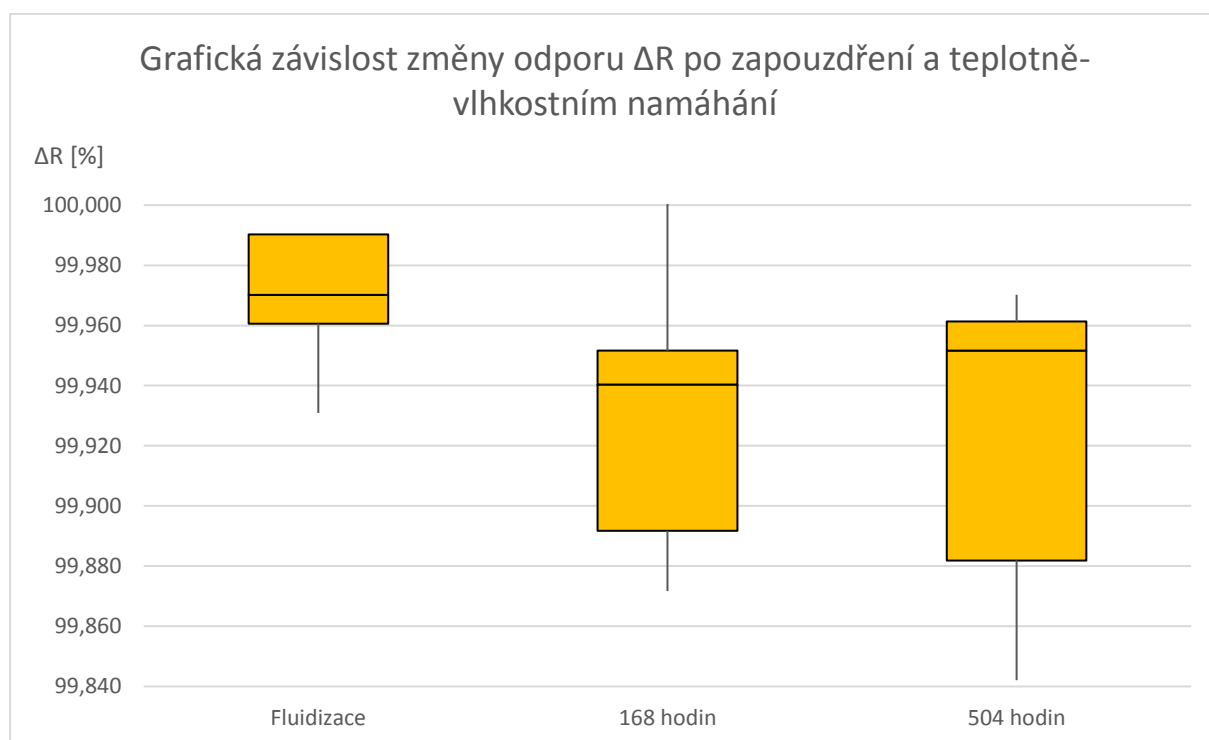


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
98	0,4	100,000	99,987	99,967
103	0,4	100,000	99,964	99,957
104	0,4	100,000	100,007	99,993
Minimální hodnota		100,000	99,964	99,957
První kvartil Q_{25}		100,000	99,976	99,962
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,987	99,967
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,997	99,980
Maximální hodnota		100,000	100,007	99,993

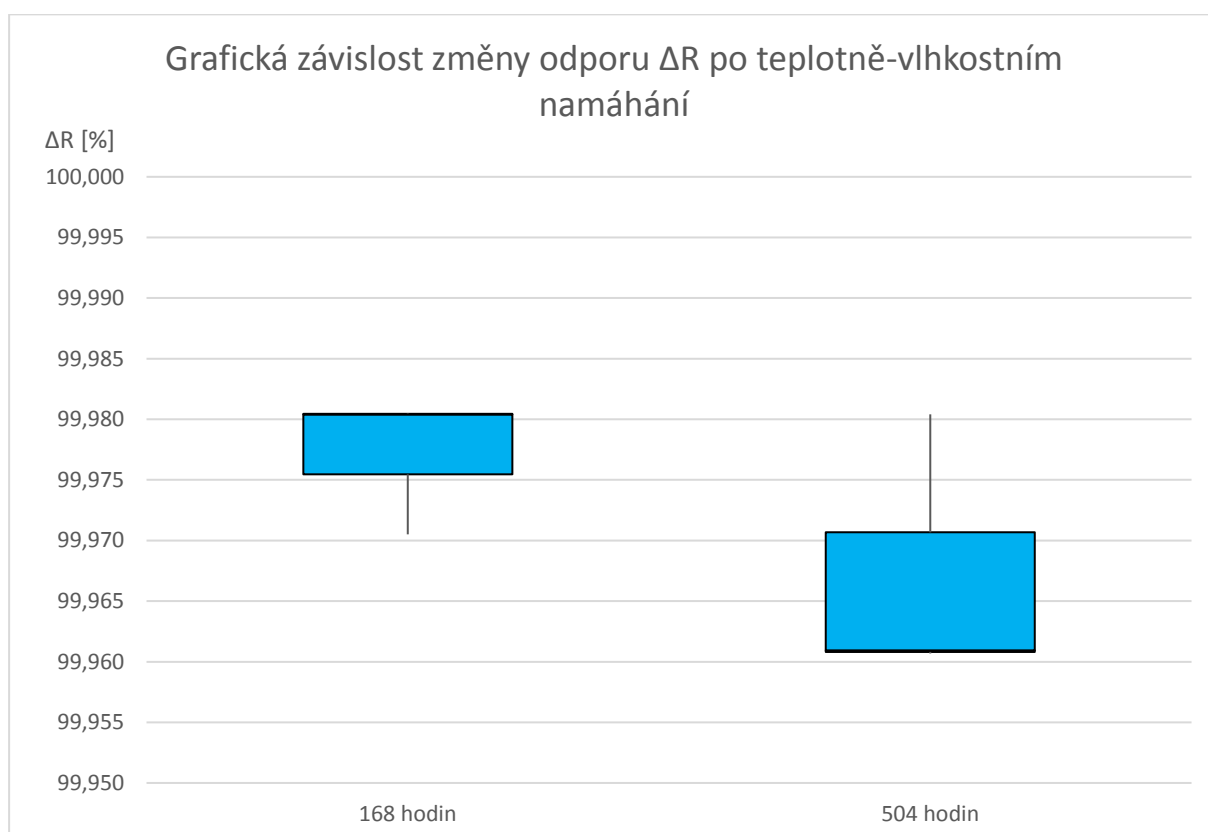


Vertikální meandr 100 Ω/\square tloušťka 0,5 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
105	0,5	100,000	99,961	99,892	99,882
106	0,5	100,000	99,990	99,952	99,961
107	0,5	100,000	99,970	99,940	99,970
108	0,5	100,000	99,931	99,872	99,842
109	0,5	100,000	99,990	100,010	99,952
Minimální hodnota		100,000	99,931	99,872	99,842
První kvartil Q ₂₅		100,000	99,961	99,892	99,882
Druhý kvartil Q ₅₀		100,000	99,970	99,940	99,952
Třetí kvartil Q ₇₅		100,000	99,990	99,952	99,961
Maximální hodnota		100,000	99,990	100,010	99,970

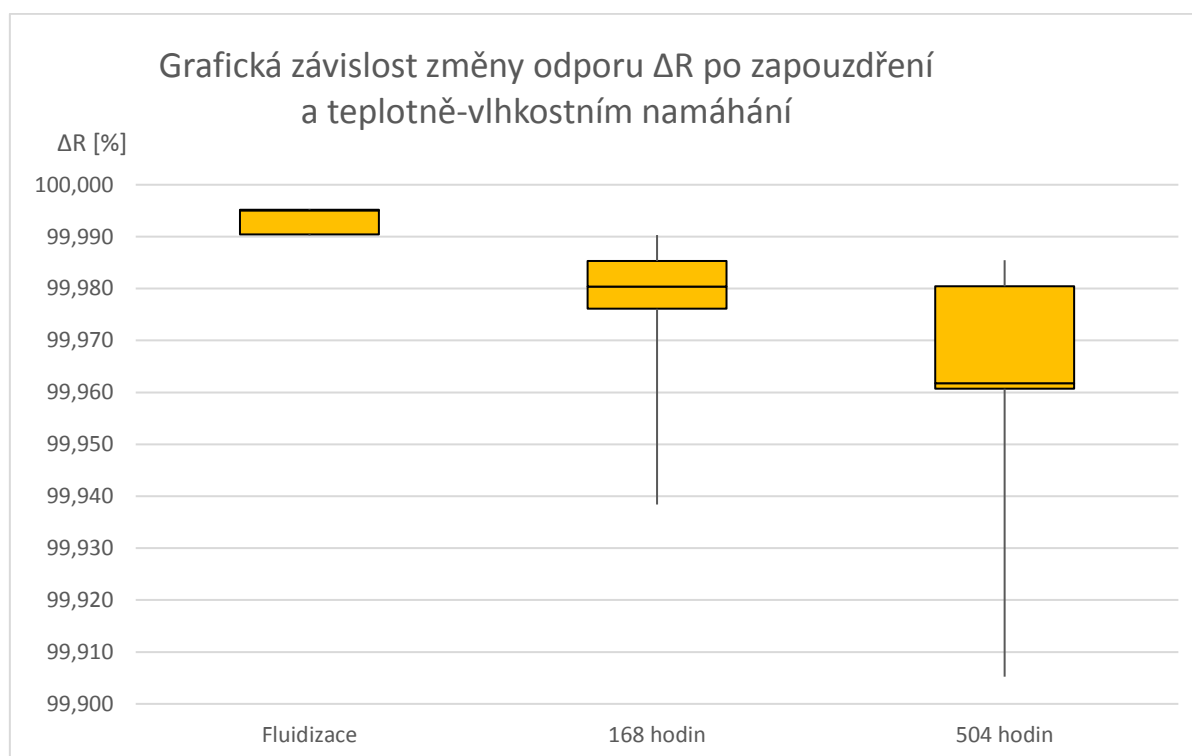


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
110	0,5	100,000	99,980	99,961
111	0,5	100,000	99,971	99,961
112	0,5	100,000	99,980	99,980
Minimální hodnota		100,000	99,971	99,961
První kvartil Q ₂₅		100,000	99,975	99,961
Druhý kvartil Q ₅₀		100,000	99,980	99,961
Třetí kvartil Q ₇₅		100,000	99,980	99,971
Maximální hodnota		100,000	99,980	99,980

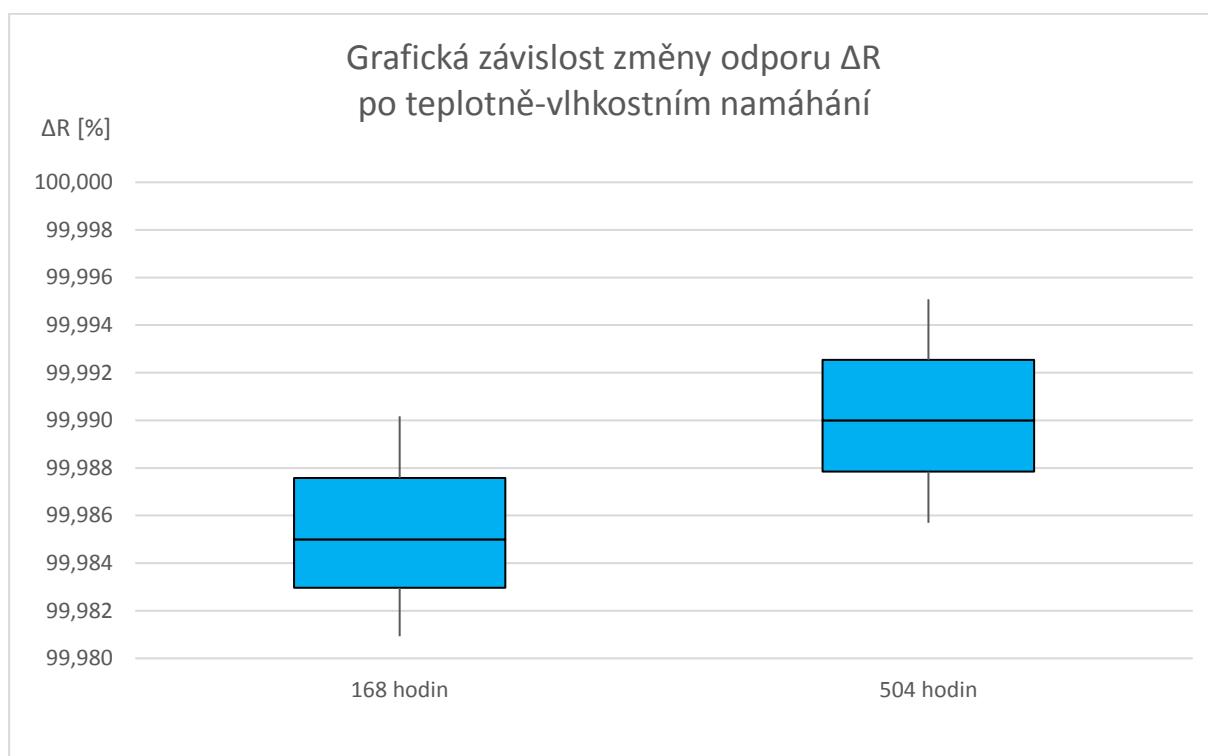


Horizontální meandr 100 Ω/\square + dielektrická vrstva - tloušťka 0,4 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
113	0,4	100,000	99,995	99,990	99,985
114	0,4	100,000	99,990	99,976	99,962
115	0,4	100,000	99,995	99,938	99,905
117	0,4	100,000	99,995	99,980	99,961
118	0,4	100,000	99,990	99,985	99,980
Minimální hodnota		100,000	99,990	99,938	99,905
První kvartil Q_{25}		100,000	99,990	99,976	99,961
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,995	99,980	99,962
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,995	99,985	99,980
Maximální hodnota		100,000	99,995	99,990	99,985

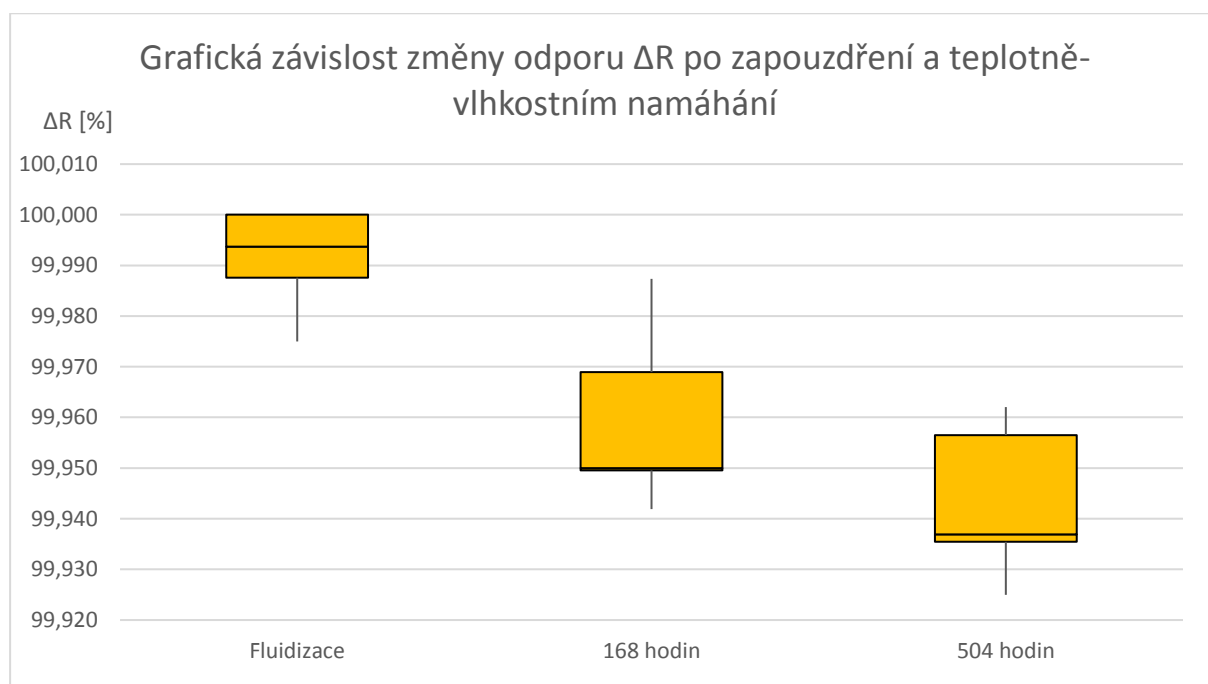


Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
116	0,4	100,000	99,981	99,986
119	0,4	100,000	99,985	99,990
120	0,4	100,000	99,990	99,995
Minimální hodnota		100,000	99,981	99,986
První kvartil Q_{25}		100,000	99,983	99,988
Druhý kvartil Q_{50}		100,000	99,985	99,990
Třetí kvartil Q_{75}		100,000	99,988	99,993
Maximální hodnota		100,000	99,990	99,995



Horizontální meandr 100 Ω/\square + dielektrická vrstva - tloušťka 0,5 mm

Zapouzdřené vzorky					
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]			
		Výchozí	Fluidizace	168 hodin	504 hodin
121	0,5	100,000	99,994	99,950	99,937
124	0,5	100,000	100,000	99,942	99,935
126	0,5	100,000	99,988	99,969	99,957
127	0,5	100,000	99,975	99,950	99,925
128	0,5	100,000	100,000	99,987	99,962
Minimální hodnota		100,000	99,975	99,942	99,925
První kvartil Q₂₅		100,000	99,988	99,950	99,935
Druhý kvartil Q₅₀		100,000	99,994	99,950	99,937
Třetí kvartil Q₇₅		100,000	100,000	99,969	99,957
Maximální hodnota		100,000	100,000	99,987	99,962



Nezapouzdřené vzorky				
Číslo vzorku	Šířka odporové cesty [mm]	Elektrický odpor R [%]		
		Výchozí	168 hodin	504 hodin
122	0,5	100,000	100,013	100,006
123	0,5	100,000	99,994	99,987
125	0,5	100,000	99,994	99,988
Minimální hodnota		100,000	99,994	99,987
První kvartil Q ₂₅		100,000	99,994	99,988
Druhý kvartil Q ₅₀		100,000	99,994	99,988
Třetí kvartil Q ₇₅		100,000	100,003	99,997
Maximální hodnota		100,000	100,013	100,006

